

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем**

«На правах рукопису»
УДК 621.391.1

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

«__» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
на тему: «Методика порівняльної оцінки якості цифрових каналів в
мультисервісних системах зв'язку з відомими характеристиками
достовірності»**

Виконав :

студент II курсу, групи ТС-81мн

Ольховик Дмитро Миколайович _____

Керівник:

доцент кафедри ТС, к.т.н. , доцент,

Мошинська А.В. _____

Рецензент:

доцент кафедри ІТМ, д.т.н. , доцент,

Скулиш М.А. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(172.3620.1 «Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ольховику Дмитру Миколайовичу

1. Тема дисертації «Методика порівняльної оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку з відомими характеристиками достовірності», науковий керівник дисертації Мошинська Аліна Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження – цифровий канал зв'язку
4. Предмет дослідження – якість передачі цифрових сигналів
5. Перелік питань, які потрібно розробити:
 - провести аналіз існуючих методів оцінки якості каналів зв'язку;
 - розробити алгоритму оцінки параметрів якості цифрових каналів зв'язку;

— провести аналіз параметрів якості цифрових каналів на основі розрахунків за отриманими значеннями.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Плакат №1 «Тема, мета та завдання магістерської дисертації»

Плакат №2 «Публікації за результатами магістерської дисертації»

Плакат №3 «Типи помилок у рекомендації ITU-T G.826

Плакат №4 «Ієрархія параметрів якості передачі цифрових сигналів»

Плакат №5 «Граничні характеристики цифрових каналів зв'язку»

Плакат №6 «Висновки»

7. Орієнтовний перелік публікацій

1) Мошинська А.В., Ольховик Д.М. Методика оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку //Мошинская А.В., Ольховик Д.М - «Перспективи телекомунікації 2019»: тринадцята міжнародна науково-технічна конференція, присвячена Дню науки та Всесвітньому Дню телекомунікацій 15-19 квітня 2019 р., К.: с. 49...51;

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка, оформлення узгодження та затвердження технічного завдання на роботу.	30.09.18	Робочі матеріали
2	Вибір напрямку досліджень. Аналітичний огляд інформаційних матеріалів.	25.10.18	Робочі матеріали
3	Опрацювання першого розділу. Дослідження параметрів якості цифрових сигналів згідно стандартів та рекомендацій ITU	28.12.18	Робочі матеріали
4	Опрацювання другого розділу. Визначення параметрів якості цифрового сигналу за ймовірністю помилки на біт інформації	28.02.19	Робочі матеріали
5	Опрацювання другого розділу. Дослідження залежності параметрів якості цифрового сигналу від довжини блоку	28.04.19	Робочі матеріали
6	Опрацювання другого розділу. Розробка імітаційної моделі та вибір програмних засобів для оцінки показників якості цифрового сигналу.	28.06.19	Робочі матеріали
7	Опрацювання третього розділу. Розробка імітаційної моделі дослідження передачі пакетів с помилками при заданих параметрах каналу зв'язку	05.11.19	Робочі матеріали
8	Опрацювання третього розділу. Порівняльний аналіз результатів аналітичної та імітаційної моделей	25.02.20	Робочі матеріали
9	Підготовка тез та доповіді на студентський секції конференції ПТ-20	16.04.20	Тези
10	Оформлення дипломної роботи згідно діючих правил	30.04.20	Рукопис

Студент

(підпис)

/Д.М. Ольховик/

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

/А.В. Мошинська/

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Робота містить 77 сторінок, 21 ілюстрацію, 6 таблиць, 1 додаток. Було використано 22 джерела інформації.

Актуальність. У класичній теорії телекомунікацій показником достовірності виступає ймовірність помилки інформаційного біта. У сучасних міжнародних стандартах і рекомендаціях існує своя ієрархія показників якості каналу зв'язку, заснована на вимірюваннях, яка не пов'язана з класичною теорією завадостійкості. Таким чином, єдиної методики визначення показників якості каналів телекомунікацій не існує.

Метою дослідження є створення такої єдиної методики оцінки якості зв'язку, за допомогою якої знання, пропонувані в класичній теорії завадостійкості, можна зробити прикладними за допомогою сучасних міжнародних рекомендацій та стандартів.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- провести аналіз існуючих методів оцінки якості каналів зв'язку;
- розробити алгоритму оцінки параметрів якості цифрових каналів зв'язку;
- провести аналіз параметрів якості цифрових каналів на основі результатів практичних розрахунків з використанням сучасних пакетів програмного забезпечення для отримання формульних виразів.

Об'єкт дослідження - цифровий канал зв'язку.

Предмет дослідження - показники якості передачі цифрового сигналу.

Наукова новизна роботи полягає у створенні раніше не визначеного взаємозв'язку між показниками якості передачі цифрового сигналу класичної теорією завадостійкості та сучасних міжнародних стандартів.

Апробація. Результати, що включені у дану роботу, були оприлюднені на міжнародній науковій конференції:

1) XIII Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2019" 15.04-19.04.2019р. на базі Інституту телекомунікаційних систем та НДІ телекомунікацій КПП ім. Ігоря Сікорського.

Публікації:

1) Мошинська А.В., Ольховик Д.М. Методика оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку // Мошинская А.В., Ольховик Д.М - «Перспективи телекомунікації 2019»: тринадцята міжнародна науково-технічна конференція, присвячена Дню науки та Всесвітньому Дню телекомунікацій 15-19 квітня 2019 р., К.: с. 49...51;

Ключові слова: цифровий канал зв'язку, якість передачі цифрових сигналів, коефіцієнт помилкових блоків, коефіцієнт секунд з помилками, коефіцієнт секунд з численними помилками, ймовірність помилки на біт.

ABSTRACT

The work contains 77 pages, 21 illustrations, 6 tables, 1 supplement. 22 sources of information were used.

Topicality. In the classical theory of telecommunications reliability index serves probability of error bits of information. In modern international standards and recommendations has its own hierarchy of quality indicators link is not related to the classical theory of immunity. Thus, a single methodology for determining quality of telecommunications channels do not exist.

The aim of the study is to develop a uniform methodology for assessing the quality of communication in which the knowledge offered by the theory of noise immunity and expressed analytic formulas; it can be applied using current recommendations of international organizations in the field of telecommunications. To achieve this goal the following tasks were set:

- to analyze of existing methods for assessing the quality of communication channels;
- to develop algorithms assess quality parameters of digital communication channels;
- to analyze the quality parameters of digital channels on the basis of practical computation with using of the special software sets and appropriate formulae.

The object of study - a digital channel.

The subject of research – quality digital signal transmission.

Scientific novelty of work to do is to create a previously defined relationship between indicators of quality digital signal transmission classical theory of immunity and modern international standards.

Approbation. The results included in this work we represented at one international conference:

- 1) XIII International Scientific Conference "Modern Challenges in Telecommunications 2019" 15.04-19.04.2019 y. at the Institute of

Telecommunication Systems and Telecommunications Research Institute KPI them. Igor Sikorsky.

Publications:

1) Moshynskaya AV DA Olkhovyk METHODOLOGY OF QUALITY ASSESSMENT OF DIGITAL CHANNELS IN MULTISERVICE COMMUNICATION SYSTEMS// AV Moshynska, Olkhovyk DA - "Modern Challenges in Telecommunications 2019", the thirteen international scientific conference devoted to the Day of Science and World Day of Telecommunications , 15-19 April 2019, K .: p. 49 ... 51;

Keywords: digital communication channel quality digital signal rate of erroneous blocks seconds coefficient errors coefficient seconds with numerous errors, the probability of error per bit.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	13
1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ КАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ.....	15
1.1 Показники якості каналів телекомунікацій.....	16
1.1.1 Коефіцієнт бітових помилок.....	17
1.1.2 Часові показники якості каналів зв’язку	19
1.2 Вимірювання показників якості цифрових сигналів.....	23
1.3 Ймовірнісна оцінка параметрів якості цифрових каналів	35
1.4 Критерії якості цифрових каналів, що застосовуються на практиці	38
1.4.1 Критерії якості для систем GSM	39
1.4.2 Критерії якості для систем UMTS.....	39
1.4.3 Критерії якості для систем LTE.....	41
1.5 Нові тенденції та стандарти для оцінки показників якості цифрових каналів зв’язку	43
1.6 Висновки з першого розділу	44
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЦИФРОВОГО СИГНАЛУ ЗА ЙМОВІРНІСТЮ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ	46
2.1 Параметри якості передачі цифрового сигналу Міжнародного союзу електрозв'язку	46
2.1.1 Помилковий блок	50
2.1.2 Секунда з помилками.....	51
2.1.3 Секунда з численними помилками.....	52
2.2 Синтез методики оцінки якості цифрових сигналів зв’язку	54
2.3 Ієрархія параметрів якості цифрових сигналів зв’язку	57
2.4 Висновок з другого розділу	60

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ КАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ ЗГІДНО ІСНУЮЧИХ СТАНДАРТІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ СИСТЕМ ЗВ’ЯЗКУ З ВІДОМИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДОСТОВІРНОСТІ	61
3.1 Детальний аналіз і напрямки покращення існуючої методики.....	61
3.2 Розрахунок граничних параметрів для якісної оцінки цифрових каналів зв’язку з заданими характеристиками достовірності	63
3.3 Висновок до третього розділу.....	71
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТКИ.....	77
Додаток А. Лістинг програми розрахунків, що застосовується для аналізу показників якості передачі цифрових сигналів зв’язку у Розділі 3	
Мова програмування MATLAB, пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB	77

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

EB	Erorred Block	Помилковий блок (блок, що містить один або більше помилкових бітів)
ES	Errored Second	Секунда з помилками (секунда, що містить хоча б один блок з помилками або дефект)
SES	Severely Errored Second	Секунда с численними помилками (секунда, що містить 30% блоків з помилками або, принаймні, один період з серйозними порушеннями з'єднання)
BBE	Background Block Error	Фоновий помилковий блок (помилковий блок EB, що не є частиною секунди з численними помилками SES)
EBR	Errored Block Ratio	Коефіцієнт блоків з помилками, рівний відношенню блоків з помилками до загальної кількості блоків в сеансі вимірювання.
ESR	ErroredSecondRatio	Коефіцієнт секунд з помилками, рівний відношенню секунд з помилками до загальної кількості секунд вимірювання
SESR	Severely Errored Second Ratio	Коефіцієнт секунд численними помилками, рівний відношенню секунд с численними помилками до загальної кількості секунд вимірювання
p_0	-	Ймовірність помилки на біт
BER	Bit Error Rate	Кількість помилкових біт за одиницю часу

ЦСП	Цифрова система Передачі	-
ITU	International Telecommunication Union	Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ)
PRBS	Pseudo- RandomBitSequence	Псевдовипадкова послідовність бітів
CRC	Cyclic Redundancy Code	Циклічний надлишковий код
HRP	Hypothetical Reference Path	Гіпотетичний еталонний тракт
P_X	-	Ймовірність появи події X
N_X	-	Кількість появ події X
$M(X)$	-	Математичне очікування випадкової величини X

ВСТУП

За останні десятиліття мережі зв'язку вступили в фазу бурхливого розвитку, яка активно продовжується і в теперішній час. Цьому сприяють впровадження нових, прогресивних методів кодування, модуляцій і передачі інформації. Постачальники телекомунікаційних послуг пропонують варіації цифрових каналів різних характеристик в мультисервісних системах зв'язку з певним гарантованим рівнем послуг. Виникає питання оцінки якості надавання цих послуг. Проблема посилюється тим, що діючі в Україні норми не встигають відстежувати розвиток міжнародних стандартів і тому не є всеосяжними. В результаті користувачеві необхідні знання та тих, і інших стандартів.

У класичній теорії телекомунікацій якість передачі сигналу обумовлюється завадостійкістю каналу зв'язку та визначається достовірністю передачі інформації. Показниками достовірності виступають ймовірність помилки символу в каналі зв'язку та ймовірність помилки інформаційного біта.

У сучасних стандартах і рекомендаціях міжнародних організацій у галузі телекомунікацій існує своя ієрархія показників якості безпроводового цифрового каналу зв'язку, не пов'язана з класичною теорією завадостійкості. Вітчизняні спеціалісти з теорії завадостійкості оперуючи класичними методами не можуть коректно працювати з показниками, які є загальновизнаними світовими фахівцями у галузі телекомунікацій. Тому параметри якості цифрових каналів з рекомендацій міжнародних телекомунікаційних організацій потребують детального дослідження і мають бути поставлені у відповідність до класичної теорії завадостійкості.

У даній роботі пропонується нова методика порівняльної оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку з відомими характеристиками достовірності шляхом аналізу та поєднання рекомендацій

міжнародних організацій у сфері телекомунікацій та класичної теорії завадостійкості.

Для розробки методики порівняльної оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку у роботі проводиться детальний аналіз існуючих методів оцінки якості цифрових безпроводових каналів зв'язку, погляди сучасних стандартів та рекомендацій щодо якості передачі інформації та її параметрів. Наводиться теоретичне обґрунтування та підтвердження за допомогою імітаційного моделювання розробленої методики оцінки параметрів якості цифрових каналів зв'язку.

У першому розділі проводиться дослідження сучасних методів оцінки якості безпроводових цифрових каналів зв'язку. Визначаються основні параметри якості каналів зв'язку, яким чином вони застосовуються та вимірюються у сучасних телекомунікаційних системах, які норми на ці параметри надаються міжнародними стандартами.

У другому розділі наводиться розроблена методика для оцінки якості передачі цифрових сигналів за ймовірністю бітової помилки. Розглядається аналіз показників якості каналів зв'язку з рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку. Синтезуються аналітичні закономірності для визначення цих показників за ймовірністю помилки на біт, наводиться ієрархія параметрів якості на основі отриманих закономірностей.

У третьому розділі описується розроблена імітаційна модель, що використовується для аналізу параметрів якості каналів зв'язку. Наводиться опис моделі та аналіз поведінки цих параметрів на основі результатів моделювання.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

Сучасний стан науки та техніки характеризується всезростаючим обсягом і складністю досліджень та розробок, що призводить до істотного зростання обсягу потоків інформації, що передаються. Задача передавання великих обсягів інформації вирішується як шляхом модернізації існуючих систем, так і шляхом розвитку нових каналів зв'язку.

Процес оренди каналу зв'язку супроводжується укладанням угоди між постачальником послуги (оператором) і користувачем. Дана угода включає в себе інформацію про використовувану технологію, маршрут каналу зв'язку, його пропускну здатність і якість послуг, що надаються. Якість послуг зв'язку визначається показниками помилок, що виникають в каналі. Параметри, представлені в угоді, користувач враховує при оплаті послуг і створення своєї накладеної системи зв'язку. При цьому може виявитися, що одні й ті ж терміни сторони розуміють по-різному. Як правило, це відноситься до показників помилок. Тим часом найважливішими вимогами до методів виявлення помилок цифрового сигналу є універсальність, економічність і точність. Універсальність означає застосовність методу до будь-якого цифрового сигналу, економічність - ефективне використання додаткової пропускну здатності, ключове ж вимога - безсумнівно, висока точність.

Діючі в Україні норми не встигають відстежувати розвиток міжнародних стандартів і в певних випадках не можуть вважатись актуальними. В результаті користувачеві необхідні знання тих й інших стандартів.

Таким чином, виникає необхідність у систематизації і стандартизації показників якості каналів зв'язку.

1.1 Показники якості каналів телекомунікацій

З точки зору оцінки показників помилок канали поділяються:

- за типом тракту - на супутникові та наземні;
- за швидкістю - на канали $n \times 64$ Кбіт / с і канали, рівні E1 і вище;
- по використовуваній технології - на канали плезіохронної і синхрон цифрової ієрархії (PDH і SDH), а також канали з режимом асинхронної передачі (ATM). Самі показники помилок підрозділяються:

- за умовами експлуатації - на довготривалі, розраховані на тривалий період вимірювання - 30 діб, і оперативні, розраховані формально на короткий період вимірювання: 15 хв, 2 години, 24 години (добу) і 7 діб;

- за методикою вимірювань - на показники, виміряні при винятком сервісі (Out of Service - OoS) і в процесі роботи (при включеному сервісі, In Service Monitoring - ISM). Відповідно до цього визначають і нормують показники помилки різні стандарти і норми.

Відповідно до цього визначають і нормують показники помилки різні стандарти і норми.

Основні з них:

- для супутникових каналів зі швидкостями $n \times 64$ Кбіт/с (нижче E1) – ITU-R S.614, E1 і вище – ITU-R S.1062, для будь-яких швидкостей технології PDH - РД 45.041-99;

- для наземних трактів і каналів $n \times 64$ (нижче E1) – ITU-T G.821, для каналів E1 і вище – ITU-T G.826, G.827, для будь-яких швидкостей технології PDH – ITU-T M.2100, для будь-яких швидкостей технології SDH (VC-n і STM-n) – ITU-T G.828, M.2101.1 (M.2101).

Зазначені стандарти визначають методику оцінки і гранично допустимі значення параметрів помилки в каналах зв'язку. Причому рекомендації G.821, G.826 і G.828 передбачають використання довгострокових норм, стандартів M.2100, M.2101- оперативних норм. При цьому тільки G.821

орієнтований на методику вимірювань OoS, тоді як інші - як на OoS, так і ISM.

Провайдер певної послуги при складанні угоди спирається і посилається лише на частину цих документів. Магістральні канали зв'язку, про які йде мова, зазвичай досить протяжні та діляться на певні сегменти, що використовують різні технології і середовища передачі - супутникові, оптоволоконні, радіорелейні і т.д., формуючи так звані складові канали. Щоб обчислити гранично припустиму похибку в такому каналі, потрібно знати показники помилок для різних сегментів, які можуть визначатися по-різному, якщо сегменти різні за типом, протяжності і використовуваної технології (наприклад, канал 2 Мбіт / с може на одному сегменті розглядатися як канал PDH, а на іншому - як триб SDH, що передається в потоці STM-N у вигляді віртуального контейнера VC-12).[8]

1.1.1 Коефіцієнт бітових помилок

Основна перевага цифрової передачі в порівнянні з аналоговою полягає у відсутності накопичення перешкод вздовж лінії. Це досягається за рахунок відновлення форми сигналу, що передається, на кожній регенераційній ділянці.

Всі чинники, від яких залежить довжина ділянки, можна розділити на внутрішні і зовнішні. Найбільш важливими внутрішніми вважають загасання лінії, міжсимвольні перешкоди, нестабільність тактової частоти системи, варіацію затримки, зростання рівня шумів внаслідок старіння системи.

До істотних зовнішніх чинників зазвичай відносять перехідні і імпульсні перешкоди, зовнішні електромагнітні впливи, механічні пошкодження контактів при вібрації або ударах, погіршення властивостей середовища передачі внаслідок перепадів температури.

Всі вони зазвичай зумовлюють погіршення найбільш чутливого до помилок параметра цифрової передачі - співвідношення сигнал/шум. Дійсно, зниження величини даного співвідношення всього на 1 дБ призводить до збільшення узагальненого параметра якості цифрових систем передачі, яким є коефіцієнт бітових помилок (Bit Error Rate, BER), щонайменше на порядок.

Згідно з визначенням, BER є відношенням числа помилково прийнятих бітів до загальної кількості прийнятих бітів. Його величина статистично коливається біля значення середнього коефіцієнта помилок за тривалий проміжок часу. Різниця між безпосередньо виміряним коефіцієнтом помилок і довготривалим середнім значенням залежить від числа контрольованих біт і тим самим від тривалості вимірювання. База часу формується за допомогою двох основних методів.

Відповідно до першого з них, на приймаючому кінці задається фіксоване число спостережуваних біт і реєструється відповідна кількість біт з помилками.

Наприклад, якщо число помилково прийнятих біт дорівнювала 20, а заданий загальне число прийнятих біт - 10^6 , то коефіцієнт помилок складе $20/10^6 = 20 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-5}$.

Перевагою такого підходу є точно відоме час вимірювання, а недоліком - невисока надійність вимірювання при малому числі помилок.

Відповідно до другого методу, час вимірювань визначається заданим числом помилок. Вимірювання триває до тих пір, поки, наприклад, не буде зафіксовано 100 помилок. Потім на підставі відповідного числа бітів даних обчислюється коефіцієнт помилок.

Його недолік полягає в тому, що невідомо час вимірювань, яке при малих коефіцієнтах помилок може виявитися дуже великим. Крім того, цілком можливо, що лічильник біт даних заповниться повністю, і вимірювання припиняться. Тому такий спосіб використовується нечасто.

На початковому етапі розвитку цифрових систем передачі вони застосовувалися головним чином для передачі аналогового телефонного сигналу, і тому вимоги до якості цифрових систем передачі визначалися характеристиками цього сигналу.

Помилка в цифровому сигналі приводить до швидкої зміни величини сигналу АІМ на вході канального демодулятора, і абонент чує неприємний клацання на виході каналу ІКМ. Експериментально встановлено, що помітні клацання виникають тільки при помилках в одному з перших двох найбільших за вагою символів кодової групи, що відповідає максимальному (позитивному чи негативному) зміни сигналу АІМ. Якість зв'язку вважається задовільним, якщо в кожному каналі спостерігається не більше одного клацання в хвилину. При частоті дискретизації, рівної 8 кГц, по каналу передається $8000 \times 60 = 480$ тис. Кодових груп в хвилину, причому небезпечними щодо клацань є 960 тис. Старших розрядів. Якщо вважати, що ймовірність помилки для будь-якого розряду кодової групи однакова, то при допущенні одного клацання в хвилину ймовірність помилки в лінійному тракті не повинна бути більше $1/960\,000 = 10^{-6}$.

З урахуванням передачі даних, яка більш чутлива до помилок передачі, для еталонного міжнародного сполучення протяжністю 27 500 км величина BER не повинна перевищувати 10^{-7} . [9]

1.1.2 Часові показники якості каналів зв'язку

Як показник якості зв'язку для оцінки ВОЛЗ параметр BER практично не використовується, оскільки виміряні значення BER (наприклад, в діапазоні 10^{-9} - 10^{-13}) мало що говорять про справжній рівень помилок в каналі, який, як правило, складається з декількох сегментів (наприклад, СКС + РРЛ + ВОЛЗ + АЛ). Так, ВОЛЗ з $BER \leq 10^{-13}$ забезпечує приблизно те ж споживчу якість каналу зв'язку, що і супутникова система зв'язку з $BER \leq 10^{-7}$ (хоча

різниця в величині BER - шість порядків). Тому BER як експлуатаційна норма безпосередньо не використовується для міжнародних з'єднань і для складеного каналу, і виміряні значення BER на таких каналах показником якості зв'язку служити не можуть.

Більш адекватно якість послуг в каналі зв'язку характеризують параметри помилок, засновані на понятті "секунди з помилками", які можна виміряти не тільки при вимкненому сервісі (OoS), але і безпосередньо в процесі роботи (ISM - без відключення сервісу). Для оперативних норм вимірювання проводяться протягом інтервалу T , обраного з чотирьох стандартних значень: 15 хвилин, 2 години, добу або 7 діб. Однак в нормах на приймання та технічне обслуговування каналів фігурують, як правило, тільки 15 хв і добу, які і рекомендується вказувати в Угоді. У ВОЛЗ, наприклад в системах SDH і WDM (технології мультиплексування з поділом по довжині хвилі), є вбудовані в систему управління мережею NMS (Network Management System) засоби контролю секунд з помилками. Якщо NMS немає, то для вимірювань цих показників необхідно спеціальне дороге обладнання.

Один з найважливіших показників якості каналу зв'язку в цьому випадку - число секунд з помилками N_{ES} (Number of Errored Seconds) за вказаний період T . Визначення "секунд з помилками" (ES) залежить від швидкості каналу. Якщо вона нижче $E1$, то використовують показник $ES_{OЦК}$. Він, по ITU-T G.821, відповідає секунді, в якій спостерігалася хоча б одна помилка.

Для каналів зі швидкістю $E1$ і вище, з огляду на фреймову структуру, оперують помилковим бітом, а блоком з помилкою - EB (Errored Block), і відповідний показник ES_{E1} визначають по ITU-T G.826 як секунду, протягом якої спостерігався один дефект або блок, що містить хоча б одну помилку. Блок - це логічна послідовність біт (не обов'язково фізично безперервна), яка використовується в процесі моніторингу робочих характеристик в режимі без

відключення сервісу (ISM). Довжина блоку залежить від використовуваного в каналі коду з виявленням помилок. Наприклад, для потоку PDH E1 довжина блоку дорівнює 2048 біт, а в мережах SDH для еквівалентного йому віртуального контейнера VC-12 - 1120 біт. Дефект - характерну зміну робочих параметрів в процесі моніторингу без відключення сервісу, а саме: втрата сигналу (LOS), сигнал індикації аварійного стану (AIS), втрата фреймової синхронізації (LOF) або (лише в системах SDH) сигнал індикації віддаленого дефекту (RDI).

На практиці замість параметра NES також використовують і еквівалентний йому нормований показник Error Seconds Ratio.

Показники на основі ES більшою мірою відображають одиничні помилки. Однак при однаковій кількості помилок їх локалізація у часі може бути різною. Наприклад, на мідних АЛ в основному присутні поодинокі помилки, на СКС - пачки помилок. Наслідки таких помилок, так само як і способи боротьби з ними, різні. Тому показника NES недостатньо, так як він не розрізняє, сталася одиночна помилка на секундному інтервалі або групова.

Це враховує параметр N_{SES} (the number of Severely Errored Seconds) - число секунд з серйозними помилками за вказаний період T . Йому еквівалентний нормований показник $SESR = N_{SES}/T$. Секунда з серйозними помилками SES (іноді цей термін невірно перекладають як "секунда, уражена помилками", так як цьому відповідає і ES) визначається двояко ($SES_{ОЦК}$ і SES_{E1}). ВТУ-Т G.821 визначає $SES_{ОЦК}$ як секунду, в якій коефіцієнт помилок $BER > 10^3$ (в даному випадку BER визначається на $T = 1$ с; ніякі інші рівні помилок (10^4 або 10^5) не можуть використовуватися в принципі як і відповідні методики даних вимірювань).

SES_{E1} , по G.826, відповідає секундi, яка містить більше 30% блоків з помилками (EB), або в якій спостерігався хоча б один період з серйозними порушеннями (SDP). SDP - це відрізок повідомлення довжиною в 4

послідовних блоку, в кожному з яких або в середньому за 4 блоки коефіцієнт помилок $BER \geq 10^{-2}$ або сталася втрата сигнальної інформації.

Ще один важливий показник - Unavailability, період неготовності мережі, або недоступність послуги. Це проміжок часу, що починається з 10 послідовних SES (що включаються в цей період) і закінчується після виявлення 10 послідовних секунд без SES (які не включаються до період неготовності). Поняття, протилежне цьому - період готовності мережі (Availability), що дорівнює часу моніторингу T мінус період неготовності. Еквівалентний йому нормований показник готовності вимірюється у відсотках як відношення часу готовності до загального періоду T . Саме цей показник використовується в Угодах. Його ще називають працездатністю послуги і номінальною продуктивністю. Важливо відзначити, що при вимірюванні параметрів N_{ES} , N_{SES} (і еквівалентних їм) період вимірювань T повинен повністю укладатися в період готовності, тобто при вимірюванні періодів неготовності бути не повинно.

Проілюструємо вищесказане простим прикладом. Нехай канал включає супутниковий і абонентський ділянки. Кожен з них має свій показник готовності $A_{сп}$ і $A_{аб}$, отже, загальний показник готовності $A = A_{сп} \cdot A_{аб}$. Супутниковий сегмент характеризується рідкісними пачками помилок великої довжини, тому навіть при $BER = 10^{-7}$ при добовому тесті можна отримати готовність каналу $A_{сп}$ не гірше 99,95-99,97. На абонентської (мідної) лінії, навпаки, щодо часті поодинокі помилки. Тому при тому ж BER показник готовності каналу $A_{аб}$ для ОЦК складе 99,36. Отже, загальний показник готовності каналу A буде не краще 99,31-99,33. З огляду на, що показники BER і A не вимірюються системами модемного зв'язку на "останній милі", отримати їх можна лише опосередковано. Як правило, провайдер магістрального каналу не займається організацією зв'язку на "останній милі", тому цю ділянку логічно виключити з Угоди, де вказується загальний показник готовності.

У стандартах також використовується поняття блоку з фонові помилкою BBE (Background Block Error). Під фоновими розуміють помилки, які не є частиною SES. Блоки з фонові помилкою враховують показники NBBE (the number of Background Block Errors) - число блоків з фоновими помилками за період T і еквівалентний нормований показник $BBER = NBBE/T$. Ці параметри нечасто використовуються на мережі і зазвичай не вказуються в Угоді (крім мереж SDH, що використовують ВОЛЗ), так як немає коштів їх вимірювання. На СКС ці показники нормуються для високошвидкісних каналів, починаючи з E1 (2 Мбіт/с).

Ще один параметр - DM (Degraded Minutes), хвилини з періодами деградації сигналу, - прибраний з нової редакції стандарту G.821 як важко піддається вимірюванню.[8]

1.2 Вимірювання показників якості цифрових сигналів

Ключовим параметром якості ЦСП є помилки. Показників помилок безліч, всі вони будуть по-черзі розглянуті нижче. Найпростіший з них - коефіцієнт бітових помилок (Bit Error Ratio, BER). Нагадаємо, що під BER слід розуміти відношення кількості помилкових бітів до їх загального переданому числа.

Необхідно відзначити, що за інших рівних умов BER залежить від кількості переданих бітів. Наприклад, довга послідовність однакових символів може викликати низькочастотну амплітудну модуляцію і детермінований джитер, наслідком яких буде зростання числа помилок. Для забезпечення коректності порівняння різних ЦСП використовуються типові випробувальні послідовності, причому кожної стандартної швидкості передачі відповідає своя випробувальна послідовність. За своїми властивостями вони близькі до гаусового шуму, але мають певний період повторення. Тому вони називаються не просто випадковими, а

псевдовипадковими послідовностями (ПВП) (Pseudo-RandomBitSequence, PRBS).

Помилки можна виявити двома основними методами. По-перше, під час приймання та налаштування ліній зв'язку, пошуку несправностей і ремонту виконуються вимірювання з перервою зв'язку, які реалізуються за трьома схемами підключення: точка-точка, шлейф і транзит. (див. Рисунок 1.1)

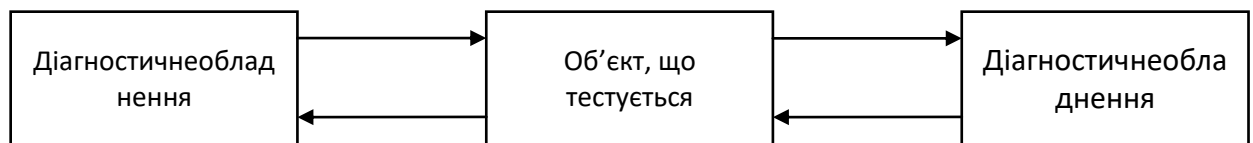


Рисунок 1.1 Вимірювання з перериванням зв'язку

По-друге, для моніторингу мережі та якісної оцінки її стану, виявлення і усунення пошкоджень використовуються вимірювання без переривання зв'язку. (див. Рисунок 1.2)

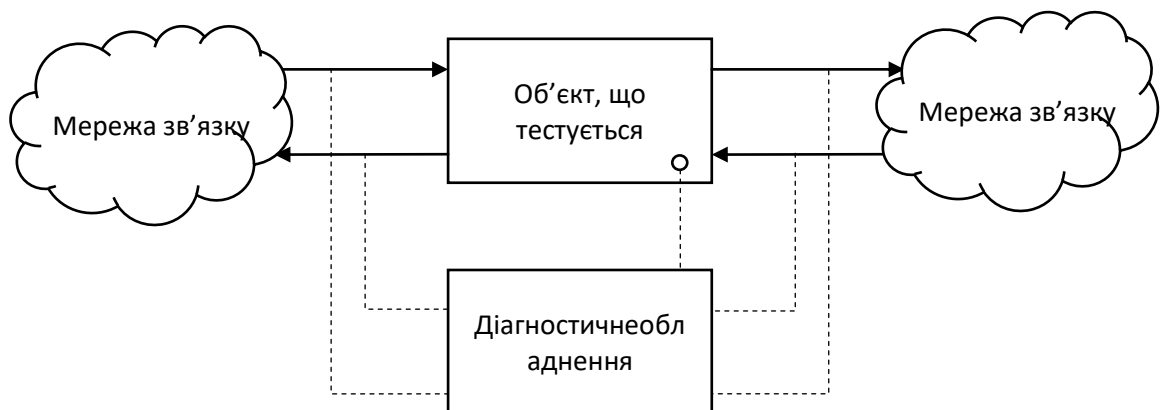


Рисунок 1.2 Вимірювання без переривання зв'язку

Вимірювання BER без переривання зв'язку вимагає точного знання структури цифрового сигналу. Таким сигналом в складі циклу, наприклад первинного цифрового сигналу Е-1, є циклової синхросигнал, що займає 7 біт нульового каналного інтервалу (КІ) сигналу Е-1. Циклової сигнал

передається в кожному другому циклі сигналу E-1, причому кожен цикл E-1 містить 32 КІ і, отже, $32 \times 8 = 256$ біт. Таким чином, відносна частка циклового синхросигналу в сигналі E-1 становить $7 / (256 \times 2) < 1,4\%$. Тому достовірність оцінки BER за допомогою циклового синхросигналу дуже низька.

Ще один відомий метод оцінки якості цифрової передачі заснований на виявленні помилок коду. Він використовується, наприклад, в цифрових трактах T-1 / E-1, де застосовуються коди з чергуванням полярності одиниць АМІ і HDB-3. Однак за допомогою вимірника помилок коду можна виявити істинне значення коефіцієнта бітових помилок. Відхилення між результатами вимірювання помилок коду і звичайного вимірювання помилок методом побітового порівняння стають особливо помітними при коефіцієнтах помилок більш 10^{-3} . Крім того, порушення правил кодування часто поширюється і на декілька біт, що знаходяться після біта з помилкою. Внаслідок цього залежне від змісту сигналу зміщення і похибка при великих коефіцієнтах помилок унеможливають точний аналіз розподілу помилок.

Отже, практична оцінка BER можлива тільки в режимі вимірювань з перервою зв'язку і посилкою еталонних випробувальних сигналів. При вимірюванні BER випробувальний сигнал повинен якомога краще імітувати реальний, тобто мати випадковий характер. Як такого випробувального сигналу зазвичай використовують псевдовипадкову послідовність бітів (ПВП) з заданою структурою, близькою до справжнього інформаційного сигналу. Такі послідовності формуються тактованими регістрами зсуву зі зворотним зв'язком. Цифровий випробувальний сигнал замінює зазвичай передається інформаційний сигнал і оцінюється на приймальному кінці вимірником помилок.

Таким чином, необхідний в умовах нормальної експлуатації безперервний моніторинг помилок цифрової передачі методом BER без перерви зв'язку практично неможливий.

В даний час для оцінки якості цифрових систем передачі в експлуатаційних умовах застосовується метод вимірювання блокових помилок. Як неважко здогадатися, головна його перевага полягає в тому, що він заснований на використанні самого інформаційного сигналу і виконується без переривання зв'язку.

Всі методи вимірювання блокових помилок припускають введення надмірності в інформаційний сигнал, обробку цього допоміжного сигналу за певним алгоритмом і передачу результату обробки на приймаючу сторону, де прийнятий сигнал обробляється за тим же алгоритмом, що і при передачі, а підсумок порівнюється з результатом обробки, отриманим від передавальної сторони. При їх різниці переданий блок вважається помилковим.

Відомо кілька способів виявлення блокових помилок. Способи поблочного контролю парності і контрольної суми не дозволяють розпізнати всі типи помилок, тим самим обмежуючи їх практичне застосування. Мабуть, єдиним універсальним способом вимірювання помилок без перерви зв'язку є контроль за допомогою циклічного надмірного коду (Cyclical Redundancy Check, CRC).

Слід особливо підкреслити, що оцінка BER буде абсолютно точною тільки при нескінченно великому числі переданих бітів. Строго кажучи, коли їх кількість обмежена, ми отримуємо не ймовірність події BER, а його оцінку BERT. Очевидно, що рівень достовірності цієї оцінки (Confidential Level, CL), званий також довірчою ймовірністю, залежить від кількості зареєстрованих помилок і від загального числа переданих бітів N .

Це підтверджують дані таблиці (див. Таблицю 1.1), де наведені необхідні значення нормованої тривалості $N \times BER$ в залежності від числа зареєстрованих помилок E і рівня достовірності оцінки CL - чим більше число зареєстрованих помилок і рівень достовірності оцінки CL, тим більше число бітів необхідно передати.

Типова схема вимірювання BER припускає наявність генератора випробувальних бітових (символьних) послідовностей тестера BER, випробуваного об'єкта (регенератора, ділянки ЦСП і т. Д.) І детектора помилок тестера BER.

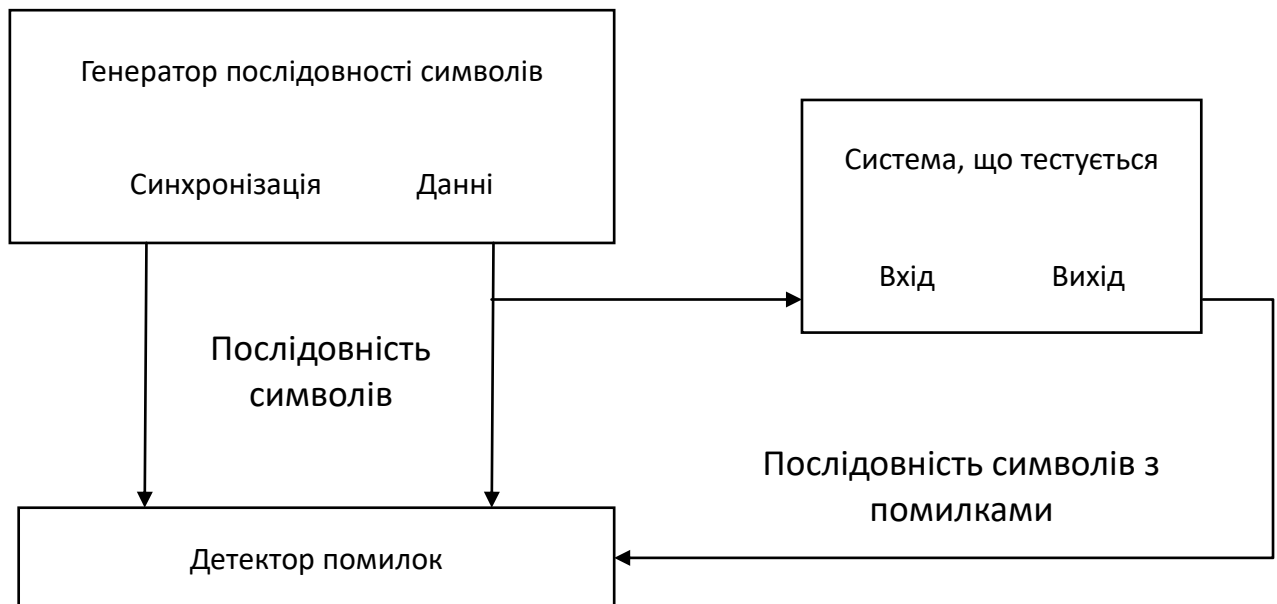


Рисунок 1.3 Схема підключення установки для вимірювання коефіцієнта помилок

Генератор тестера BER формує випробувальні сигнали, які подаються на вхід тестованого об'єкта. Генератор тестованого сигналу є також джерелом сигналу для детектора помилок тестера BER. Тестований об'єкт може бути територіально поєднаний з тестером BER або перебувати в віддаленому пункті. У будь-якому випадку випробуваний об'єкт повинен бути виведений з експлуатації і сигнал з його виходу поданий на вхід приймача тестера BER. Як кажуть зв'язківці, має бути організований вимірювальний шлейф.

Детектор помилок отримує випробувальний сигнал з виходу тестованого об'єкта або формує точну копію цього сигналу автономно. Випробувальний сигнал генератора порівнюється побітно до сигналу з

виходу випробуваного об'єкта. Кожне відмінність сигналів детектор фіксує як бітову помилку. Необхідну синфазність двох зазначених сигналів забезпечує детектор помилок, в якому передбачена необхідна затримка сигналу з виходу генератора. Завдання фазування сигналів зазвичай виконується на етапі калібрування тестера BER.

Випробувальні сигнали тестерів BER стандартизовані. Як вже зазначалося вище, інформаційний сигнал в тестерах BER імітується у вигляді так званих псевдовипадкових послідовностей ПВП (PRBS), вони формуються у відповідності зі стандартними алгоритмами і розрізняються числом генеруються символів $M = 2^k - 1$, де k - ціле число. В генераторах тестерів BER передбачена можливість створення довільних випробувальних послідовностей, званих зазвичай кодовими словами.

Очевидним недоліком BER є необхідність виведення тестованого об'єкта з експлуатації (Out of Service, OoS), що цілком прийнятно в процесі розробки або ремонту об'єкта і незручно, якщо ЦСП вже експлуатується. Крім того, параметр BER хороший для оцінки впливу одиночних перешкод, обумовлених гаусовими процесами, наприклад власними і перехідними перешкодами. У той же час в будь-якій реальній системі зв'язку присутні і цілі пакети таких помилок (їх ще називають серійними помилками). Тому без знання тимчасової структури помилок системи зв'язку неможлива ефективна локалізація ушкоджень і накопичення адекватної інформації про якість розробки та інсталяції обладнання. По суті, одного параметра BER недостатньо для коректної оцінки роботи ЦСП. Необхідні більш адекватні, що враховують структуру перешкод, показники якості ЦСП з можливістю їх моніторингу в процесі нормальної експлуатації системи зв'язку (In Service Monitoring, ISM).

Як було показано вище, коефіцієнт бітових помилок BER є ключовим параметром оцінки якості цифрових систем передачі (ЦСП). Цей параметр незамінний при перевірці цифрової апаратури (наприклад, регенераторів) на

етапі її розробки і ремонту, коли обладнання виведено з експлуатації. А що ж робити, коли цифрові канали і тракти потрібно протестувати в процесі їх нормальної експлуатації?

У параметра BER є й інший суттєвий недолік: цей показник практично неможливо використовувати для оцінки якості цифровий лінії. При замовленні будь-якої послуги зв'язку користувач і провайдер повинні укласти угоду про якість обслуговування (Service Level Agreement, SLA), де чітко обумовлюються двосторонні зобов'язання. Для оцінки якості сеансу зв'язку в цифровому каналі або тракті логічно використовувати відносне число помилок передачі за фіксовані інтервали часу - за секунду або за період передачі фіксованої групи бітів, яку називають блоком.

Саме ці показники покладені в основу двох базових рекомендацій ITU-T - G.821 і G.826, про які ми і поговоримо нижче. Цього року виповнилося чверть століття з моменту прийняття рекомендації G.821 «Параметри помилок міжнародного цифрового з'єднання мережі ISDN на швидкості нижче первинної». Першою мережею, де з'єднання між двома користувачами було повністю цифровим, була мережа ISDN. Первинними швидкостями ISDN є швидкості сигналів T-1 і E-1, рівні 1544 і 2048 кбіт / с, відповідно. Нижче первинної стандартом передбачаються швидкості $64 \times N$, де 64 Кбіт / с являє собою пропускну здатність основного (або базового) цифрового каналу (ОЦК), а $N < 24$ в разі T-1 і $N < 31$ в разі E-1.

В рекомендації G.821 як параметр помилок цифрового з'єднання обрані два наступних: Число секунд з помилками (Errored Second, ES), до яких відноситься кожна секунда, в якій є принаймні одна помилка. Як впливає з визначення, при такому підході одиночна помилка і пакет помилок не розрізняються. Число секунд з численними помилками (Severely Errored Second, SES), де SES означає секунду з коефіцієнтом помилок $\geq 10^{-3}$.

Оскільки обидва параметри - і ES, і SES - залежать від часу вимірювання T, для практичної оцінки якості цифрового з'єднання

застосовують їх відносні значення: $\text{Errored Second Ratio ESR} = \text{ES} / T$ і $\text{Severely Errored Second Ratio SESR} = \text{SES} / T$.

Зауважимо, що наявність двох параметрів оцінки помилок дозволяє не тільки більш точно визначити якість цифрового з'єднання, але і в багатьох випадках виявляється корисним при локалізації можливих пошкоджень.

З поширенням широкосмугових послуг зв'язку рамки використання рекомендації G. 821 ставали все більш вузькими. Спроби ж пристосувати її для вимірювання широкосмугових цифрових трактів виявилися невдалими. Крім того, визначення параметрів якості в G.821 ґрунтується на оцінці бітових помилок, а ті, в свою чергу, можуть бути точно визначені лише тоді, коли достовірно відома вимірюється цифрова послідовність. Тому тестування відповідно до G.821 можливо тільки при виведенні цифрового з'єднання з експлуатації.

Таким чином, фахівці потребували нової рекомендації, де враховувалися б реалії цифрових мереж зв'язку, включаючи потребу тестування каналу зв'язку в робочому режимі, в тому числі і в цифрових з'єднаннях із застосуванням обладнання синхронної цифрової ієрархії SDH і асинхронної передачі ATM.

Всім цим вимогам відповідає рекомендація G.826 «Параметри і норми помилок міжнародних цифрових з'єднань на швидкості вище первинної», схвалена ІТУ-Т в 1993 р Вона забезпечила рішення трьох головних завдань по організації тестування помилок цифрових з'єднань:

- під час нормальної експлуатації;
- на швидкостях 1544 Кбіт / с, 2048 Кбіт / с і вище;
- в мережах з використанням технологій SDH і ATM.

Перше завдання було вирішене шляхом переходу від тестування помилок по бітам до тестування помилок по блоках. Нагадаємо, блок являє собою групу послідовних бітів, які відносяться до досліджуваного цифрового тракту. Кожен біт належить до певного блоку. Контроль блоків виконується

за допомогою вбудованих в системи передачі спеціальних пристроїв, застосування яких гарантує виявлення помилки з надійністю не нижче 90%.

Серед безлічі відомих способів блочного контролю помилок трьом зазначеним вимогам найбільш повно задовольняє метод циклічного контролю за надмірності (Cyclic Redundancy Code, CRC).

Метод CRC заснований на поділі і множенні многочленів. При цьому подільний многочлен є послідовну запис блоку даних в двійковій формі. Наприклад, в системі E-1 блок даних, для якого розраховується CRC, складається з 256 байт. Тому ділене записується як двійкове число довжиною 2048 біт, яке за особливим правилом ділиться на обраний так званий породжуючий многочлен. Отриманий залишок використовується в якості контрольної інформації і передається по каналу зв'язку разом з інформаційним сигналом.

Аналогічна обробка отриманого блоку даних виконується на приймаючій стороні, і залишок ділення многочленів порівнюється з переданим залишком. Різниця зазначених залишкових многочленів є ознакою помилки в цифровому сигналі. В рекомендації G.826 визначено три типи блокових помилок: секунда з помилками (Errored Second, ES), що містить хоча б один блок з помилками або дефект; секунда з численними помилками (Severely Errored Second, SES), що містить $\geq 30\%$ блоків з помилками або, принаймні, один період з серйозними порушеннями з'єднання (Severely Disturbed Period, SDP); блок з фонові помилкою (Background Block Error, BBE) - блок з помилками поза зазначених помилками секунд (SES).

При вимірах під час нормальної експлуатації SDP спостерігаються, якщо з'являються так звані дефекти, по-різному визначаються в плезіохронних (PDH) і синхронних (SDH) системах, а також при асинхронної передачі (ATM). До цієї категорії належать пропажа сигналу (Loss of Signal, LOS), втрата циклової синхронізації (Loss of Frame, LOF) або прийом сигналу індикації аварійного стану (Alarm Indication Signal, AIS). При вимірах з

виведенням з експлуатації розпізнається SDP, якщо частота помилок протягом часу тестування становить $\geq 10^{-2}$.

В рекомендації G.826, як і в G.821B, застосовуються три відносних параметра блокових помилок: коефіцієнт секунд з блочними помилками (Errored Second Ratio, ESR), рівний відношенню секунд з блочними помилками до загальної кількості секунд вимірювання; коефіцієнт секунд з сильними блоковими помилками (Severely Errored Second Ratio, SESR), рівний відношенню секунд з сильними блоковими помилками до загальної кількості секунд вимірювання; коефіцієнт блоків з фоновими помилками (Background Block Error Ratio, BBER), рівний відношенню блоків з помилками до загальної кількості блоків в сеансі вимірювання, причому при розрахунку BBER все блоки з інтервалів з сильними помилками виключаються.

Потрібно мати на увазі, що при розрахунку всіх трьох параметрів враховується тільки час, протягом якого система передачі знаходиться в стані готовності. Параметр готовності цифрового з'єднання обов'язково включається в SLA. Система вважається неготовою з того моменту часу, після якого мають місце 10 послідовних секунд з сильними помилками SES. Згідно з тим же визначенням, система передачі знову повертається в стан готовності, якщо принаймні протягом 10 послідовних секунд помилок не спостерігається або це помилки SES.

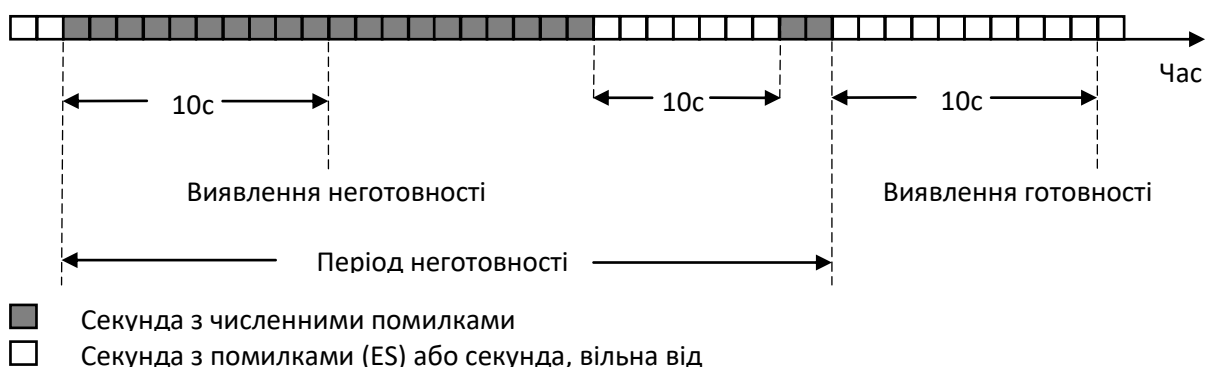


Рисунок 1.4 Приклад визначення недоступності

Нормований показник готовності системи являє собою відношення часу її готовності до загального часу роботи. Реальні значення показника надійності системи складають 99,5%. Якщо в аналогових системах передачі (АСП) потужність перешкод в каналах пропорційна довжині з'єднання, то в ЦСП існує лінійна залежність числа помилок від довжини з'єднання. Тому при розрахунку помилок в ЦСП, як і при розрахунку шумів в АСП, використовується принцип гіпотетичного еталонного тракту (Hypothetical Reference Path, HRP).

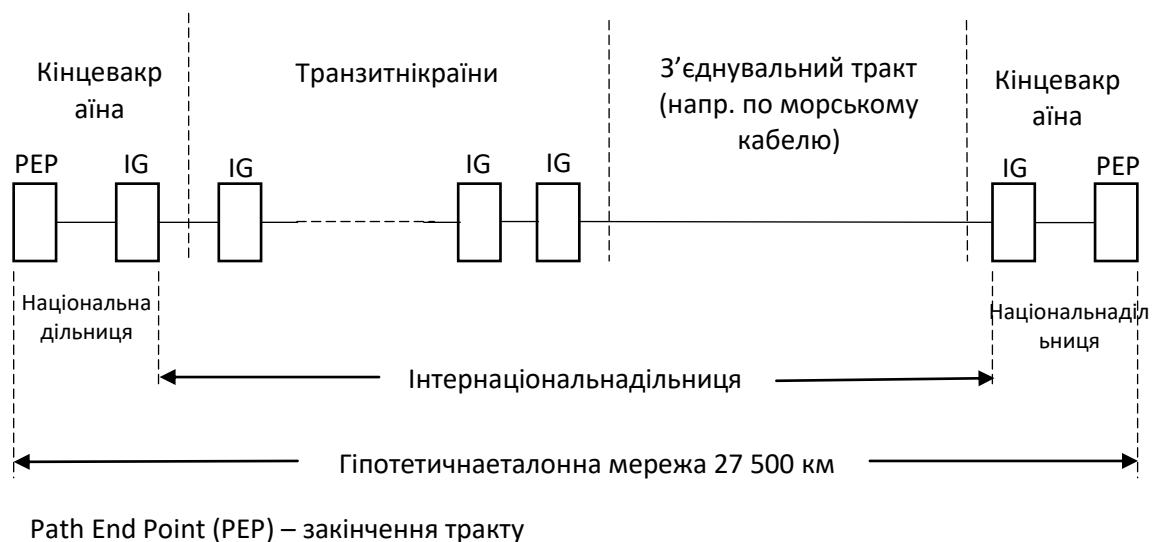


Рисунок 1.5 Гіпотетична еталонна мережа згідно із рекомендацією G.826

Еталонні тракти відповідно до рекомендацій G.821 і G.826 мають протяжність 27 500 км і описують розподіл показників помилок уздовж міжнародного цифрового з'єднання. Обидва ланцюги відображають особливості нормування показників помилок, затверджені в зазначених рекомендаціях.

Таблиця 1.1 Вимоги до показників помилок для гіпотетичної еталонної мережі згідно із рекомендацією G.826

Швидкість	Підключення	Лінії з'єднання				
	Від 64 кбит/с до первинної швидкості	От 1,5 до 5 (Мбит/с)	>5 до 15 (Мбит/с)	>15 до 55 (Мбит/с)	>55 до 160 (Мбит/с)	>160 до 3500 (Мбит/с)
Біти/ Блок	Не застосовується	800-5000	2000-8000	4000-20 000	6000-20 000	15 000-30 000
ESR	0.04	0.04	0.05	0.075	0.16	-
SESR	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
BBER	Не застосовується	2×10^{-4}	2×10^{-3}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	1×10^{-4}

Норми ESR, згідно G.826, збільшуються з ростом швидкості передачі, однак не пропорційно швидкості, а з помітним відставанням. Звідси випливає, що допустима ймовірність помилки зі збільшенням швидкості знижується - наприклад, для тракту VC-4 вона становить близько 10^{-9} . Ця величина приблизно на три порядки жорсткіше тієї, що наведена в G.821.

Непропорційне підвищення норми ESR зі збільшенням швидкості в рекомендації G.826 зроблено навмисно. Як показує досвід, секунди з помилками викликані не тільки неминучим фоновим шумом в системі передачі, але і часто виникають через нестаціонарних зовнішніх перешкод. Останні мають постійну тривалість, яка не залежить від швидкості передачі розглянутого тракту.

Порівняння обговорюваних рекомендацій показує, що при переході від швидкості 64 Кбіт / с в G.821 до мінімальної швидкості 2,048 Кбіт / с в G.826 вимоги до ймовірності помилок посилюються більш ніж в 60 разів. Розподіл норм помилок в ДЕЦ, згідно G.826, наведено в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 Розподіл норм помилок у гіпотетичної еталонної мережі згідно із рекомендацією G.826

Для національних дільниць	35%
Інтернаціональна транзитна дільниця, до складу якої входять не більше ніж	8%

чотири країни транзиту	
Дві інтернаціональні дільниці, що примикають до транзитної інтернаціональної дільниці	2%
Складова, що залежить від довжини	55%

Таким чином, в G.826 застосовується (як на національному, так і на міжнародному ділянці) комбінований спосіб нормування, при якому норма містить два види складових: постійну і залежні від довжини. Це відхилення від постійної частини в розрахунку на 1 км було введено на основі практичного досвіду. Тому норма помилок ділянки передачі визначається не тільки його протяжністю, а й складністю (наприклад, з урахуванням накопичення помилок мультиплексорів).

ДЕЦ ITU-T являє собою інструмент практичного проектування систем передачі для національних адміністрацій. Кожна країна має власну ДЕЦ на основі ДЕЦ ITU-T, де враховуються особливості конкретної території. Зазвичай в якості магістрального ділянки, що відповідає міжнародному ділянці ДЕЦ ITU-T, вибирають максимальний лінійний розмір території. Так, в Україні протяжність магістрального ділянки національної ДЕЦ дорівнює 1200 км, що приблизно відповідає довжині України із заходу на схід, а в США - 6400 км, така відстань між східним і західним узбережжям. [10]

1.3 Ймовірнісна оцінка параметрів якості цифрових каналів

Отже, існують дві методики вимірювання показників помилок: при вимкненому сервісі (OoS) і при включеному сервісі (ISM). Перший метод при використанні BER дешевше і доступніше, проте його результати не адекватні реальній роботі системи зв'язку і не передбачені вітчизняними та зарубіжними стандартами в якості показників помилок міжнародних і складових каналів зв'язку. Другий метод складніше в реалізації і сьогодні

практично недоступний для невеликих компаній - користувачів. Як же при бажанні проконтролювати провайдера послуг?

Простий і часто пропонований вихід - перерахунок одних показників в інші - практично не працює, так як для цього немає і не може бути детермінованих формул. Бажано повністю перейти на другу методику, в тому числі і в СКС і РРЛ, однак це справа хоча і недалекого, але майбутнього. Сьогодні ж оптимальний варіант - отримати імовірнісні співвідношення між параметрами на основі BER і ES / SES, використовуючи моделі імовірнісних процесів, що відбуваються при вимірах. Для цього в супутникових каналах зв'язку стандарти ITU-R S.1062 і S.614 рекомендують використовувати не одноточковий (усереднений по гістограмі на інтервалі T) показник BER, а імовірнісний показник помилок BEP (Bit Error Probability), що має вигляд інтегральної функції розподілу або засновану на ній багатоточкову маску.

Суть методики в тому, що помилки контролюють за допомогою того ж BER-тестера на великій послідовності підінтервалів вимірювання, але гістограму значень BER не усереднюють, а формують на її основі інтегральну функцію розподілу BEP (t) спочатку експоненціального виду. Потім BEP (t) кусково-лінійно апроксимують принаймні в трьох інтервалах між точками $t = 0,2\%, 2\%, 10\%$ і $100\% T$, де T - стандартний інтервал вимірювання (Рисунок1). Графік, що з'єднує ці точки, відповідає так званій масці BEP. Якщо фактична маска BEP, сформована на основі вимірної гістограми BER, не перевищує в еталонних точках стандартизовані значення BEP (тобто покривається еталонною маскою), то рівень помилок в каналах цифрової передачі задовольняє вимогам стандартів G.826 / G.821.

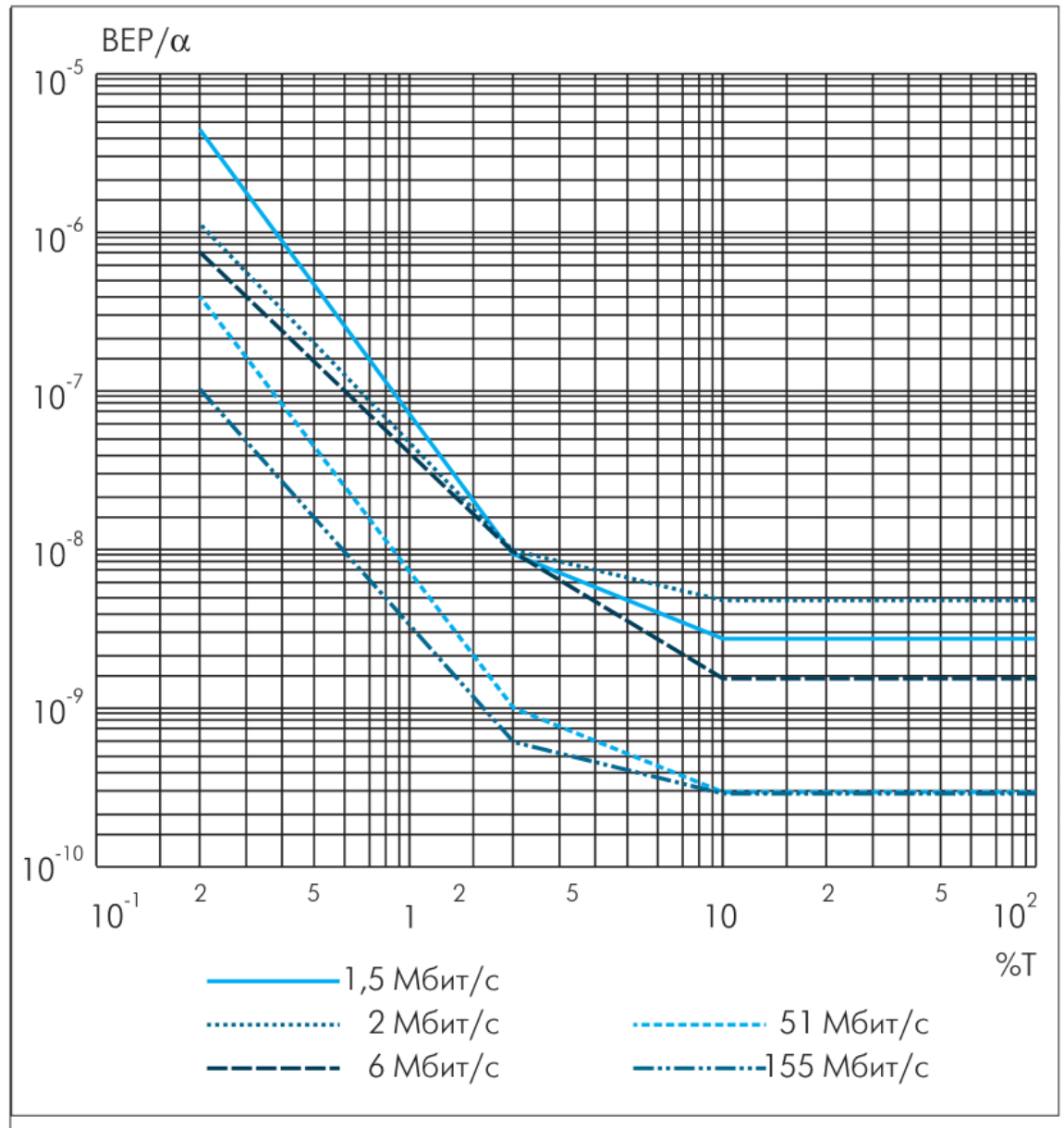


Рисунок 1.6 Маска BER/α для каналів з різною пропускнуою здатністю

Стандарти ITU-R S.1062 і S.614 задають маску у вигляді нормованої функції BER/α (T) (див. Рисунок 1.6), де α - параметр помилок, що відповідає середньому числу помилок в одному блоці на інтервалі T. Причому α залежить від статистики помилок на СКС, довжини переданих CRC- /BIP- блоків, схеми кодування, відносної швидкості кодування FEC і наявності процедур шифрування (скремблювання). Для розрахунку BER/α використовується модель помилок в супутниковому каналі зв'язку. Характер

помилки приймається пакетний, довжина блоку залежить від стандартної швидкості передачі. Передбачається, що помилки розподілені за законом Пуассона (простий варіант) або законом Неймана з післядією (складний варіант).

З даного підходу слід, що в Угодах не можна вказувати одне (усереднене) значення BER, наприклад, $+ 2 \cdot 10^{-8}$. Правильніше приводити опорні значення BER, отримані в результаті добового моніторингу і усереднені на основі BER по модельним інтервалах часу (0,2%, 2,0% і 10% T, де $T = 1$ доба). Говорити ж про невідповідність випробуваного СКС стандартному можна, тільки якщо гістограма фактичного інтегрального розподілу BER не покривається маскою модельного розподілу BER.[8]

1.4 Критерії якості цифрових каналів, що застосовуються на практиці

Зазначені в таблиці 1.1 норми помилок є універсальними і тому не відносяться до конкретного устаткування. Для практичного застосування рекомендація G.826 містить три додатки, де враховуються властивості конкретних видів обладнання, і тому працювати з ними зручніше. При цьому розрізняють аномалії і дефекти, що призводять до різних типів помилок.

Аномалією називають розбіжність між поточним і необхідним (допустимим) значенням параметра об'єкта. Приклад аномалії - помилка в цикловому синхросигналі. Дефект - це обмежений перерву у виконанні об'єктом необхідної функції; він може припускати або не передбачати дій з технічної експлуатації в залежності від результатів додаткового аналізу (див. рекомендацію ITU-T M.20). Таким є втрата циклової синхронізації внаслідок трьох послідовних аномалій, що представляють собою три послідовних помилкових синхросигналу.[8]

1.4.1 Критерії якості для систем GSM

Для систем GSM визначені наступні аномалії і дефекти.

До аномалій відносять:

- a1 - помилка в цикловому синхросигналі;
- a2 - впізнання блоку з помилками.

До дефектів відносять:

- d1 - втрата сигналу (LOS);
- d2 - прийом сигналу індикації аварійного стану (CIAC, або AIS);
- d3 - втрата циклового синхронізму (LOF).

Ці критерії використовуються для оцінки подій помилки, причому можливості оцінки залежать від структури сигналу GSM. Найбільш повна оцінка можлива, якщо переданий сигнал має як блочну, так і циклову структуру. Тоді поява будь аномалії (a1 або a2) або будь-якого дефекту (d1, d2 або d3) веде до виникнення помилки ..

Секунда з сильними помилками (SES) фіксується при великому числі аномалій (наприклад, не менше 805 в первинної ЦСП 2048 кбіт / с) або щонайменше одного дефекту. Майже всі плезіохронні системи PDH розроблялися до прийняття рекомендації G.826, тому порогові величини впізнання помилки SES, встановлені для них, відрізняються від вимог рекомендації G.826, згідно з якими помилка SES фіксується при наявності 30% уражених блоків.

Якщо ж сигнал має виключно циклову структуру, то оцінці доступна тільки аномалія a1. Всі інші умови збігаються з попереднім сигналом. Нарешті, для неструктурованого сигналу можливо лише впізнання дефектів (а значить, тільки помилок SES).

1.4.2 Критерії якості для систем UMTS

У системах SDH застосовуються пристрої контролю помилок принципово розраховані на цикл (BIP-n = паритет чергуються біт з n біт). Тому природно встановити однакові розміри циклу UMTS і блоку G.826. Теоретичний розрахунок коефіцієнта перерахунку між помилкою BIP і помилкою блоку зазвичай ґрунтується на певних моделях помилок і призводить лише до незначних відхилень від одиниці. Тому упізнані помилки BIP інтерпретуються як блоки з помилками (або як секунди з помилками).

Рекомендація G.826 містить точні вказівки для впізнання секунд з сильними помилками. Таким чином, обрані пороги відповідають 30% блоків з помилками. Це значення узгоджується з величинами, наведеними в таблиці 1.3

Таблиця 1.3 Пороги для розпізнавання секунд з численними помилками (SES)

Тип тракту	Поріг SES BIP	Кількість блоків у 1 секунді
VC-11	600	2000
VC-12	600	2000
VC-2	600	2000
VC-3	2400	8000
VC-4	2400	8000
VC-2-5c	600	2000
VC-4-4c	2400	8000

У системах UMTS інтервал часу, в якому з'являється один дефект, розглядається як секунда з сильними помилками. Критеріями для визначення дефекту служать «дефекти рівня тракту» (Path Layer Defects) з рекомендацій ITU-T G.709 і G.783. Наприклад, прийом аварійного сигналу або втрата показника (Loss of AU Pointer, Loss of TU Pointer).

1.4.3 Критерії якості для систем LTE

Поняття аномалій і дефектів визначені і в цих системах, причому в якості блоку тут виступає послідовність осередків між двома осередками ОАМ, т. Е. Тими, які використовуються для контролю якості систем АТМ (Operation, Administration and Maintenance, ОАМ). Потрібно відзначити, що при контролі цифрового тракту застосовуються ОАМ-осередки F3. аномалії:

- a1 - пошкоджені комірки АТМ (пізнавані за допомогою ОАМ-осередків F3);
- A2 - пошкоджений або виправлений заголовок;
- a3 - пошкоджена осередок F3;
- a4 - втрата осередку F3;

дефекти:

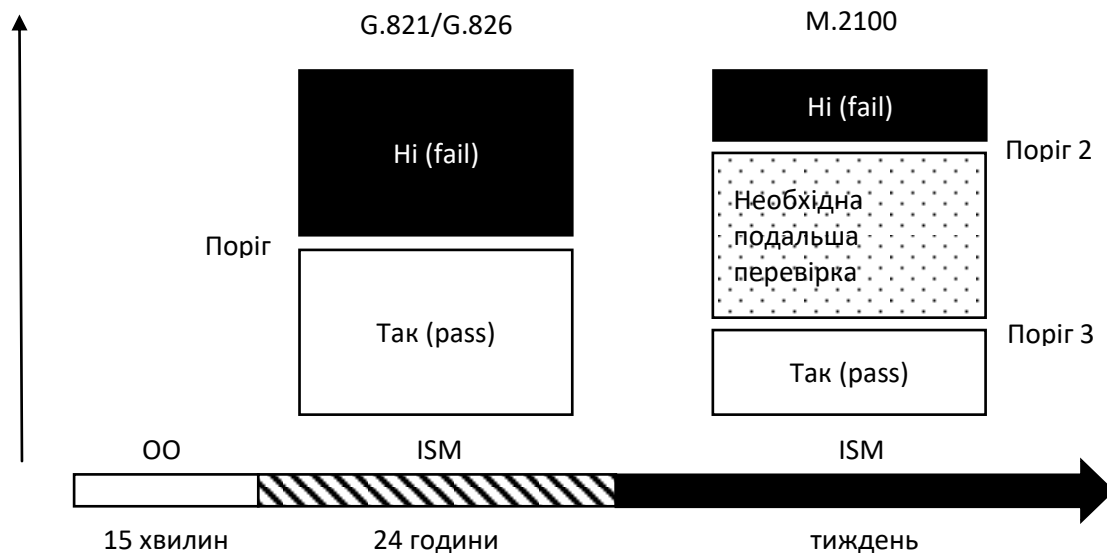
- d1 - втрата двох послідовних осередків ОАМ;
- d2 - прийом сигналу сповіщення;
- d3 - втрата синхронізації осередків;
- d4 - втрата сигналу.

Поява принаймні однієї аномалії або одного дефекту - це ознака пошкодженого блоку. Секунда, що містить 30% пошкоджених блоків або один дефект, вважається секундою з сильними помилками (SES).

Рекомендації G.821 і G.826 застосовуються, головним чином, при випробуваннях нового устаткування. Тривалість таких вимірювань становить не менше 30 діб. Тестуюча система практично однозначно видає за результатами перевірки узагальнену оцінку «так» (pass), якщо параметр знаходиться в допустимих межах, або узагальнену оцінку «ні» (fail), якщо допустимі межі перевищені.

Настільки тривалий період моніторингу обґрунтований для щойно розробленої техніки. Очевидно, що цей час надмірно при моніторингу з'єднань, для організації яких використовувалося серійне обладнання.

Вважається, що для адекватного тестування будь-якого з'єднання досить однієї доби.



Out Of Service (OOS) – вимірювання з перериванням зв'язку
In Service Measurement (ISM) – вимірювання без переривання

Рисунок 1.7 Визначення секунд із численними помилками (SES)

Це зумовило потребу в рекомендаціях, де нормувалися б тимчасові параметри процесів тестування при введенні сполуки в експлуатацію, а також при порушенні його нормальної роботи. Згідно з цими документами, перед введенням в нормальну експлуатацію з'єднання тестується протягом 15 хв. Якщо під час цього сеансу помилок не виявлено, то з'єднання включається в нормальну роботу, і його моніторинг здійснюється в умовах нормальної експлуатації ще протягом доби. Якщо в результаті значення параметра виявиться в перехідній зоні між порогами 2 і 3, то час моніторингу збільшується до тижня, чого цілком достатньо для виявлення будь-яких проблем, пов'язаних з якістю з'єднання. Таким чином, скорочення періоду тестування з'єднання вимогу введення перехідної зони між областями

узагальнених оцінок «так» (pass) і «ні» (fail), при попаданні в яку проводиться додаткове тестування (Рисунок 1.7)[12]

1.5 Нові тенденції та стандарти для оцінки показників якості цифрових каналів зв'язку

З моменту першого випуску стандартів G.821 і G.826 секції стандартизації ITU-T продовжувала інтенсивно їх удосконалювати. Вже при розробці стандарту G.826 акцент був зроблений на використання блокових, а не бітових помилок, - для того, щоб полегшити перехід на методику використання ISM (що диктувалося розвитком техніки моніторингу в NMS), а не OoS (як це було при розробці G.821). Оцінка помилок стала базуватися на чотирьох події-поняттях: EB, ES, SES і BBE. Виниклі при цьому розбіжності у визначенні ES і SES ($ES_{\text{ОЦК}} / ES_{\text{Е1}}$ і $SES_{\text{ОЦК}} / SES_{\text{Е1}}$) були офіційно відзначені в черговий версії стандарту G.826 (Appendix II, Редакція 08.96).

Крім того, фахівці відзначали істотну різницю в подіях ES і SES (в новій версії стандарту G.826 пропонується використовувати події-поняття ES-1 і ES-2, що відрізняються різним ступенем серйозності помилок) і занадто грубу шкалу відстаней, використовувану для оцінки δ (L). Все це призвело до розробки нового стандарту G.828, який рекомендує, по-перше, використовувати (спочатку як опцію) нову подію-поняття період з серйозними помилками SEP (Severely Errored Period), який визначається як період часу, протягом якого фіксується не менше 3 і не більше 9 послідовних SES. Відповідний SEP нормований показник - інтенсивність періодів з серйозними помилками SEPI (Severely Errored Period Intensity) - попередньо встановлюється на рівні $2 \cdot 10^{-4}$ / с, допускаючи тим самим 518 мікро переривань зв'язку в місяць. Крім того, стандарт G.828 рекомендує ущільнити шкалу відстаней на національному ділянці еталонного тракту з

500 до 100 км. У цьому стандарті введено поняття моніторинг тандемного з'єднання або ТС-моніторинг. Відзначимо, що G.828 використовує визначення нового стандарту G.829, який набагато більш детально описує події, що кваліфікуються як дефект і призводять до появи SES, розділяючи їх на дефекти на ближньому і віддаленому кінцях і диференціюючи їх за маршрутами нижнього і верхнього рівнів.[8]

1.6 Висновки з першого розділу

У даному розділі було проведено дослідження сучасних методів оцінки якості цифрових каналів зв'язку. Були визначені основні проблеми та труднощі, що виникають при вирішенні даної задачі.

При взаємодії між постачальником телекомунікаційних послуг (оператором) і користувачем часто виникають розбіжності щодо розуміння того, яким чином повинна оцінюватись якість надавання цих послуг. Проблема посилюється тим, що діючі в Україні норми не встигають відстежувати розвиток міжнародних стандартів і тому не є всеосяжними. В результаті користувачеві необхідні знання та тих, і інших стандартів.

У класичній теорії телекомунікацій якість передачі сигналу обумовлюється завадостійкістю каналу зв'язку та визначається достовірністю передачі інформації. Показниками достовірності виступають ймовірність помилки символу в каналі зв'язку та ймовірність помилки інформаційного біта.

У сучасних стандартах і рекомендаціях Союзу електрозв'язку ІТУ-Т існує своя ієрархія показників якості каналу зв'язку, не пов'язана з класичною теорією завадостійкості. Наприклад, до таких можна віднести коефіцієнт помилкових блоків, секунд з помилками, секунд з численними помилками, секунд с фоновими помилками.

Вітчизняні спеціалісти з теорії завадостійкості оперуючи класичними методами не можуть коректно працювати з вищенаведеними показниками, які є загальновизнаними світовими фахівцями у галузі телекомунікацій. Тому параметри якості цифрових каналів з рекомендацій міжнародних телекомунікаційних організацій потребують детального дослідження і мають бути поставлені у відповідність до класичної теорії завадостійкості.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЦИФРОВОГО СИГНАЛУ ЗА ЙМОВІРНІСТЮ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ

Якість передачі цифрового сигналу є дуже важливим показником при оцінці ефективності передачі інформації в телекомунікаційній системі. У класичних працях з теорії завадостійкості якість передачі сигналу обумовлюється завадостійкістю каналу зв'язку і визначається достовірністю передачі інформації. Показниками достовірності виступають ймовірності помилки символу в каналі зв'язку $p_{\text{пом}}$ і помилки інформаційного біта p_b . Ключовим параметром класичної теорії завадостійкості є відношення сигнал/шум h^2 . При заданих параметрах цифрового каналу зв'язку відношення сигнал/шум однозначно пов'язане із ймовірністю помилки на біт p_b . Проте світовій телекомунікаційній спільноті ймовірністю помилки на біт зазвичай представлена параметром Bit Error Ratio (англ. коефіцієнт бітових помилок). У даному розділі розглянемо параметри якості передачі цифрового сигналу Міжнародного союзу електрозв'язку та визначимо взаємозв'язок відношення значень сигнал/шум h^2 до $p_{\text{пом}}$.

2.1 Параметри якості передачі цифрового сигналу Міжнародного союзу електрозв'язку

Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ, англ. International Telecommunication Union, ITU) – спеціалізована установа ООН у сфері глобального електрозв'язку, покликана здійснювати законодавчі, управлінські, виконавчі та консультативні функції, надавати технічну підтримку, розробляти стандарти і правила у сфері електрозв'язку та формулювати рекомендації, спрямовані на активізацію розвитку телекомунікацій та підвищення якості послуг.

Основною метою співробітництва України у рамках МСЕ залишається вдосконалення та раціональне використання інформаційно-комунікаційної

інфраструктури, а також долання «цифрового розриву» в телекомунікаційних технологіях на національному та міжнародному рівнях. Супутньою метою співпраці з МСЕ залишається спільна діяльність з розробки та використання відкритих, функціонально сумісних, недискримінаційних міжнародних стандартів, що визначаються споживчим попитом.[11]

Ця міжнародна організація визначає стандарти (точніше, за термінологією МСЕ — Рекомендації, англ. Recommendations) в галузі телекомунікацій та радіо. Відповідно до рекомендації ITU-T G.820/I.351/Y.1501 основу для специфікації і відповідного розподілу показників якості у вузькосмугових і широкосмугових мережах ЦСИС, мережах, заснованих на міжмережевому протоколі (IP), і цифрових рівнях транспортних мереж утворюють рекомендації G.781, G.783, G.798, G.803, G.810, G.811, G.812, G.813, G.821, G.822, G.823, G.824, G.825, G.826, G.827, G.828, G.829, G.921, G.8201, G.8251, I.350, I.352, I.353, I.354, I.355, I.356, I.357, I.358, I.359, I.381, Y.1530, Y.1540, Y.1541, Y.1560 и Y.1561. Ці Рекомендації призначені для використання при описі показників якості між точками вимірювань, які визначають межі і розділяють міжнародні мережі ЦСИС, мережі засновані на протоколі IP і цифрові рівні транспортних мереж.

Одна з цих рекомендацій - ITU-T G.826 – розглядає параметри і норми наскрізних характеристик помилок для міжнародних цифрових трактів і з'єднань з постійною бітовою швидкістю.

У цій рекомендації визначаються наскрізні параметри і норми характеристик помилок для міжнародних цифрових трактів, які працюють на первинній швидкості або вище її, і для міжнародних цифрових з'єднань, які працюють нижче первинної швидкості цифрової ієрархії. Дані норми не залежать від фізичної мережі, яка підтримує тракт або з'єднання. Наводиться визначення доступності тракту або з'єднання, міститься конкретна інформація, що стосується PDH, СЦІ і трактів передачі, заснованих на передачі осередків.

Для цифрових трактів, що працюють на первинній швидкості або вище її, ця Рекомендація ґрунтується на концепції вимірювань, що базується на блоках, згідно з якою використовуються виявляють помилки коди, властиві випробуваному тракту. Це забезпечує вимірювання в процесі експлуатації.

Для цифрових з'єднань, які працюють на швидкості меншій первинної швидкості цифрової ієрархії, ця рекомендація ґрунтується на вимірах помилок в бітах і коефіцієнта помилок на біт. Цей підхід не забезпечує вимірювання в процесі експлуатації.

Для такого тракту переданий блок інформації може бути учасником подій, що характеризують якість передачі інформації. До таких подій у рекомендації G.826 відносять наступні:

- помилковий блок (Errored block, EB), містить один або більше помилкових бітів (інформаційних або перевірочних);
- секунда з помилками (Errored Second, ES), що містить хоча б один блок з помилками або дефект;
- секунда з численними помилками (Severely Errored Second, SES), що містить 30% блоків з помилками або, принаймні, один період з серйозними порушеннями з'єднання (Severely Disturbed Period, SDP);
- фоновий помилковий блок (background block error, BBE) – помилковий блок EB, що не є частиною секунди з численними помилками SES

Блок являє собою набір послідовних бітів, пов'язаних з трактом; кожен біт належить одному і тільки одному блоку.

Послідовні секунди з численними помилками можуть бути попередниками періодів недоступності, особливо, коли немає процедури відновлення / захисту при використанні. Періоди послідовних SES, що зберігаються протягом T секунд, де $2 \leq T < 10$ (деякі мережеві оператори посиляються на ці події як «падіння»), може мати серйозні наслідки для служби, такі як відключення комутованих послуг. Єдиний спосіб, яким це

рекомендація обмежує частоту цих подій, це через обмеження для SESR (про SESR далі по тексту).

До параметрів якості, які використовуються у рекомендації G.826 для оцінки якості передачі інформації відповідно до вище зазначених можливих помилкових станів переданого блоку інформації, належать наступні:

- коефіцієнт помилкових блоків (Errored Block Ratio, EBR), рівний відношенню блоків з помилками до загальної кількості блоків в сеансі вимірювання.
- коефіцієнт секунд з помилками (Errored Second Ratio, ESR), рівний відношенню секунд з помилками до загальної кількості секунд вимірювання;
- коефіцієнт секунд численними помилками (Severely Errored Second Ratio, SESR), рівний відношенню секунд с численними помилками до загальної кількості секунд вимірювання. [14]

Алгоритм вимірювання параметрів згідно з методологією G.826 представлений на Рисунок 2.1 Згідно з рекомендаціями G.821 і G.826 визначається час проведення вимірювань - 30 днів. Цей період забезпечує коректну об'єктивації результатів вимірювання, включаючи специфічні особливості радіочастотних цифрових систем передачі. На практиці, однак, вимірювання протягом такого тривалого періоду проводяться досить рідко. Зазвичай для експлуатаційних вимірювань вважається достатнім для об'єктивації проведення вимірювань протягом 24 годин, що визначено в M.2100.

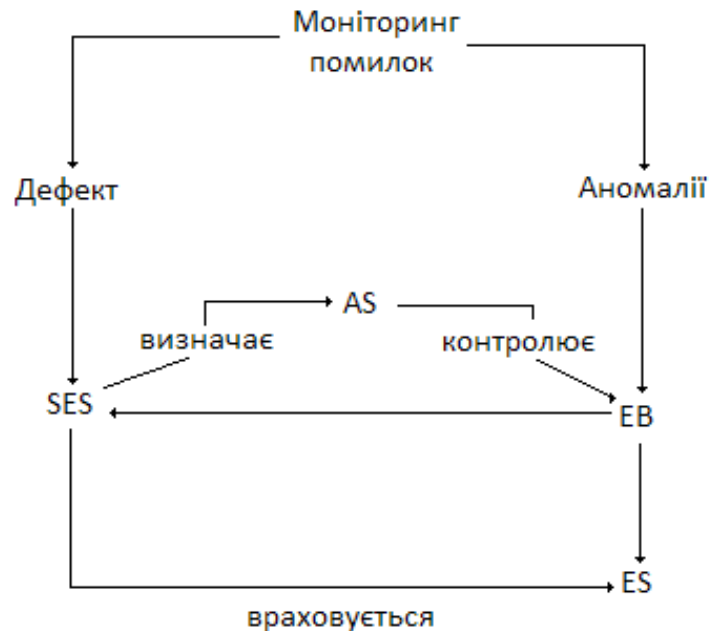


Рисунок 2.1 Алгоритм вимірювання параметрів згідно методології G.826

Як випливає з методології по G.826, в основі вимірів лежить аналіз BLER і параметрів блокових помилок. В результаті крім описаних вище схем організації вимірювань, набула поширення методика пасивного моніторингу цифрових каналів. В цьому випадку аналізатор підключається до системи передачі в стані високого опору. Всі параметри вимірюються як на ближньому кінці (Nearend), так і на віддаленому (Farend). У число параметрів вимірювань включаються параметри ES, SES і US, єдині для методології G.826 і M.2100, а також параметри BBE і ABE, що відносяться до методології G.826 і не вимірювані в методології M.2100.

2.1.1 Помилковий блок

Згідно із термінологією рекомендації G.826, блок являє собою набір послідовних бітів, пов'язаних з трактом; кожен біт належить одному і тільки одному блоку. Помилковий блок – це такий блок, в якому хоча б один біт був прийнятий з помилкою (Рисунок 2.2)

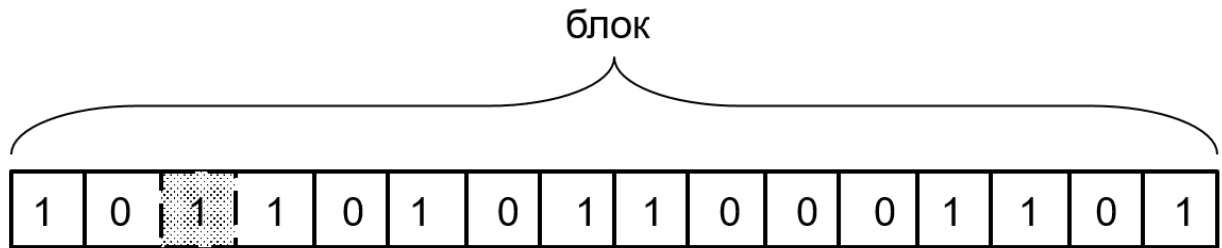


Рисунок 2.2 Помилковий блок

У телекомунікаційних каналах, до яких застосовується рекомендація G.826, довжина блоку сягає десятків тисяч біт на блок. Як бачимо із визначення та схеми, для блоку будь-якої довжини достатньо одного єдиного помилкового біту, щоб вважатися помилковим блоком. Отже довжина блоку є вагомим фактором у дослідженні показників якості, адже при одній і тій самій ймовірності помилки на біт ймовірність виникнення помилкового блоку буде суттєво відрізнятись для каналів із різними довжинами блоку.

2.1.2 Секунда з помилками

Першим типом помилки, пов'язаним із часом передачі інформації, є секунда з помилками— секунда, що містить хоча б один блок з помилками (Рисунок 2.3)

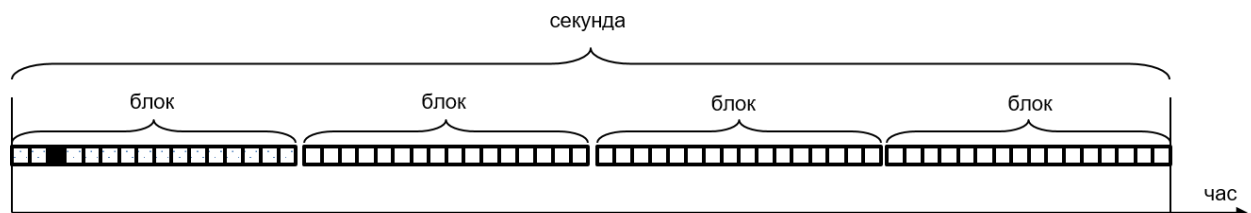


Рисунок 2.3 Секунда з помилками

Як бачимо із визначення та схеми, для виникнення секунди з помилками достатньо одного єдиного помилкового блоку. В залежності від швидкості передачі кількість блоків, які буди передані за одну секунду, буде різною. Однак швидкість передачі інформації безпосередньо не впливає на

ймовірність виникнення секунди з помилками, адже для виникнення помилкового блоку, а значить і секунди з помилками, достатньо одного єдиного помилкового біту.

2.1.3 Секунда з численними помилками

Другим типом помилки, пов'язаним із часом передачі інформації, є секунда з численними помилками – секунда, що містить 30% або помилкових блоків (Рисунок 2.4)

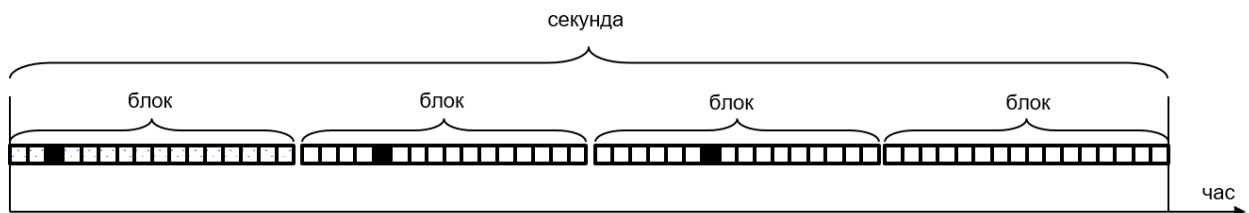


Рисунок 2.4 Секунда з помилками

Для знаходження ймовірності виникнення секунди з численними помилками зручно застосовувати біноміальний розподіл. Якщо послідовно здійснюється n незалежних випробувань, в кожному з яких якась подія A може мати місце з постійною ймовірністю p , то загальне число випробувань з результатом A являє собою випадкову величину (позначимо її μ), причому

$$P \{ \mu = i \mid n, p \} = C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

Передача деякого блоку - це дія, що являє собою послідовність дій, які полягають у передачі бітів цього блоку. Допускаючи, що передача одного біта не впливає на передачу інших бітів, можна стверджувати, що передача одного блоку не впливає на передачу інших блоків, оскільки поділ на блоки

не впливає на передачу бітів, з яких складаються ці блоки. Якщо ймовірність бітової помилки постійна, то і ймовірність виникнення блоку з помилками - постійна величина.

Знаючи ймовірність помилкової передачі блоку можна абстрагуватися від блоку як послідовності біт і прийняти послідовність блоків як послідовність незалежних випробувань з постійною ймовірністю деякого результату. Це дає право вдаватися до біноміального розподілу кількості помилкових блоків серед загального числа переданих блоків.

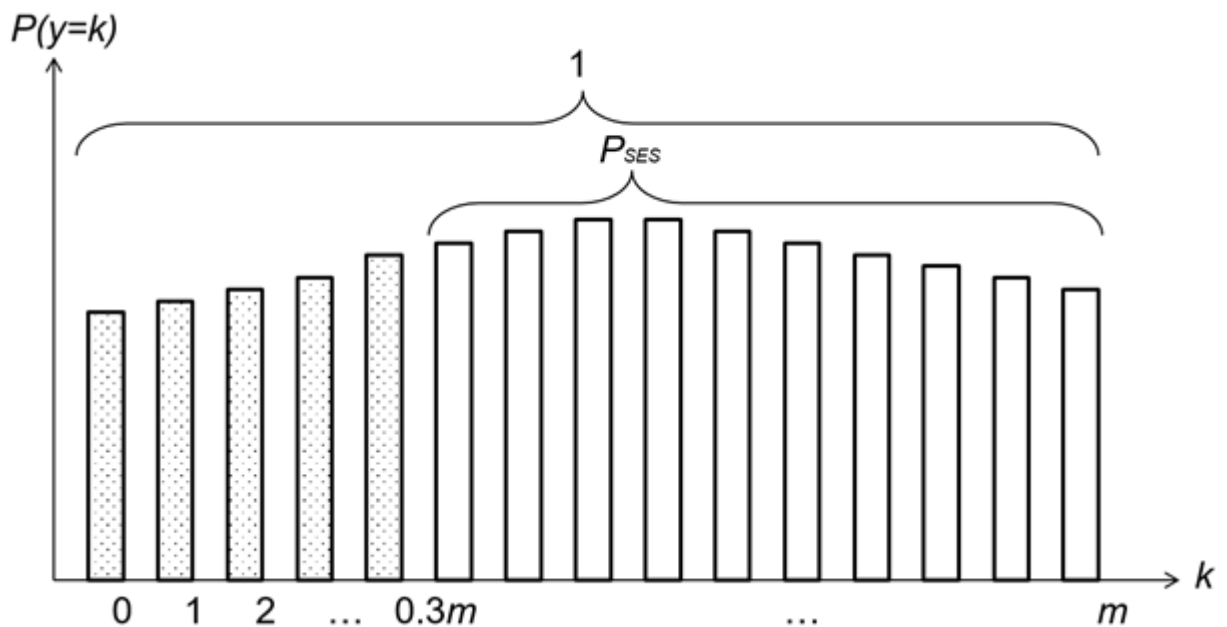


Рисунок 2.5 Секунда з помилками

На Рисунок 2.5 графічно зображено застосування біноміального розподілу для знаходження ймовірності виникнення секунди з численними помилками P_{SES} . На ньому $P(y = k)$ – ймовірність того, що кількість помилкових блоків у даній секунді буде рівна k . Кожен стовпець гістограми відповідає ймовірності $P(y = k)$ для кожного значення $k = 0, 1, 2, \dots, m$, де m – це загальна кількість переданих блоків за секунду. Ймовірність виникнення

секунди з численними помилками P_{SES} дорівнює сумі стовпців 0, 1, 2, ..., 0.3m. Сума усіх стовпців дає одиницю, оскільки настання кожного значення кількості помилкових блоків від жодного до усіх переданих являє собою повну групу подій.

2.2 Синтез методики оцінки якості цифрових сигналів зв'язку

1) Ймовірність події, протилежної тому, що жоден з n біт в блоці не був спотворений

$$P_{EB} = 1 - (1 - p)^n \quad (2.1)$$

2) Передбачається, що в одну секунду передається кількість блоків M , що є цілим числом. Таким чином, за одну секунду передається M блоків по n біт. З іншого боку кількість біт за секунду - це швидкість V . Отже,

$$M = V/n \quad (2.2)$$

Знаючи кількість блоків за секунду (2.2), а також ймовірність того, що блок помилковий (2.1), можна записати наочну формулу:

$$P_{ES} = 1 - (1 - P_{EB})^{V/n} \quad (2.3)$$

- ймовірність події, протилежної тому, що жоден блок протягом секунди не був помилковим.

Уточнимо, що блок, який потрапив в дві сусідні секунди відразу, буде впливати на обидві секунди при ідентифікації їх помилковості. Отже, кількість блоків в секунду, розраховане за формулою (2.2) завжди будемо округляти до цілого в більшу сторону.

3) Знаючи кількість блоків за секунду (2.2), а також ймовірність того, що блок помилковий (2.1), і вдаючись до *біноміального розподілу*, можна визначити ймовірність появи певної кількості помилкових блоків за одну секунду.

Нехай y - кількість помилкових блоків секунди,

$$y = 0, 1, 2 \dots k, \quad (2.4)$$

тоді

$$P(y = k) = \frac{M!}{(M-k)!k!} P_{EB}^M (1 - P_{EB})^{M-k} \quad (2.5)$$

Для виникнення секунди з численними помилками необхідно, щоб 30% і більше блоків в секунді були помилковими, тобто

$$y \geq 0.3m, \quad (2.6)$$

Тоді, використовуючи (2.2) і (2.5) з урахуванням умов (2.4) і (2.6)

$$P_{SES} = 1 - \sum_{k=0}^{k \leq 0.3m} P(y = k), \quad (2.7)$$

де від'ємник - це сума ймовірностей подій, кожна з яких полягає в появі кількості помилкових блоків в даній секунді меншої, ніж 30%.

Як бачимо, формула (2.5) при великих значеннях M стає досить незручною для розрахунку у практичних цілях, особливо при використанні її у формулі (2.7). Ця незручність зумовлена необхідністю розраховувати факторіали великих чисел велику кількість разів. Ситуація іще погіршується,

коли виникає необхідність розрахувати значення по формулі (2.7) для цілого спектру вхідних даних.

Спробуємо оптимізувати розрахунок факторіалів. Підставимо конкретні значення k у вираз із формули (2.7), що містить факторіали:

$$\sum_{k=0}^{k<0.3M} \frac{M!}{(M-k)!k!} = \frac{M!}{M!0!} + \frac{M!}{(M-1)!1!} + \frac{M!}{(M-2)!2!} + \dots + \frac{M!}{(M-0.3M)!(0.3M)!} \quad (2.8)$$

Виносимо $M!$ за дужки. Трансформуємо знаменники згідно виразу $(M - m)! = M! / (M (M - 1) (M - 2) \dots (M - m + 1))$

$$\sum_{k=0}^{k<0.3M} \frac{M!}{(M-k)!k!} = M! \left(\frac{1}{M!} + \frac{M}{M!1!} + \frac{(M-1)M}{M!2!} + \dots + \frac{(M-0.3M+1)\dots(M-1)M}{M!(0.3M)!} \right) \quad (2.9)$$

Скорочуємо $M!$ і отримуємо оптимізований вираз для розрахунку частини формули (7), що містить факторіали:

$$\sum_{k=0}^{k<0.3M} \frac{M!}{(M-k)!k!} = 1 + \frac{M}{1!} + \frac{(M-1)M}{2!} + \dots + \frac{(M-0.3M+1)\dots(M-1)M}{(0.3M)!} \quad (2.10)$$

Отримуємо формулу ймовірності виникнення секунди з численними помилками P_{SES} , оптимізовану для практичних розрахунків:

$$P_{SES} = 1 - \left(1 + \frac{M}{1!} + \frac{(M-1)M}{2!} + \dots + \frac{(M-0.3M+1)\dots(M-1)M}{(0.3M)!} \right) \times \sum_{k=0}^{k<0.3m} P_{EB}^M (1 - P_{EB})^{M-k} \quad (2.11)$$

Формула (2.11) є оптимальною з точки зору необхідності розрахунку факторіалів. Розрахунок трьох факторіалів у виразі $\frac{M!}{(M-k)!k!}$ ми замінили на розрахунок факторіалу у знаменнику $(0.3M)!$ та розрахунок чисельнику

$(M - 0.3M + 1) \dots (M - 1)M$, що є добудком останніх $M - 0.3M$ множників факторіалу чила M .

Таким чином, пропонується нова методика оцінки показників якості передачі інформації. Задаючи вихідні данні, а саме швидкість джерела V , розміром блоку n і ймовірністю помилки на біт p можна визначити ймовірність появи помилок в одному блоці і вірогідність появи одного або більше помилкових блоків в переданій послідовності символів, приводячи теоретичні показники завадостійкості до стандартизованих показників достовірності в телекомунікаційних системах.

2.3 Ієрархія параметрів якості цифрових сигналів зв'язку

З метою систематизації співвідношень між різними параметрами якості цифрового сигналу пропонується ієрархія параметрів якості цифрового сигналу, відображена на схемі Рисунок 2.5

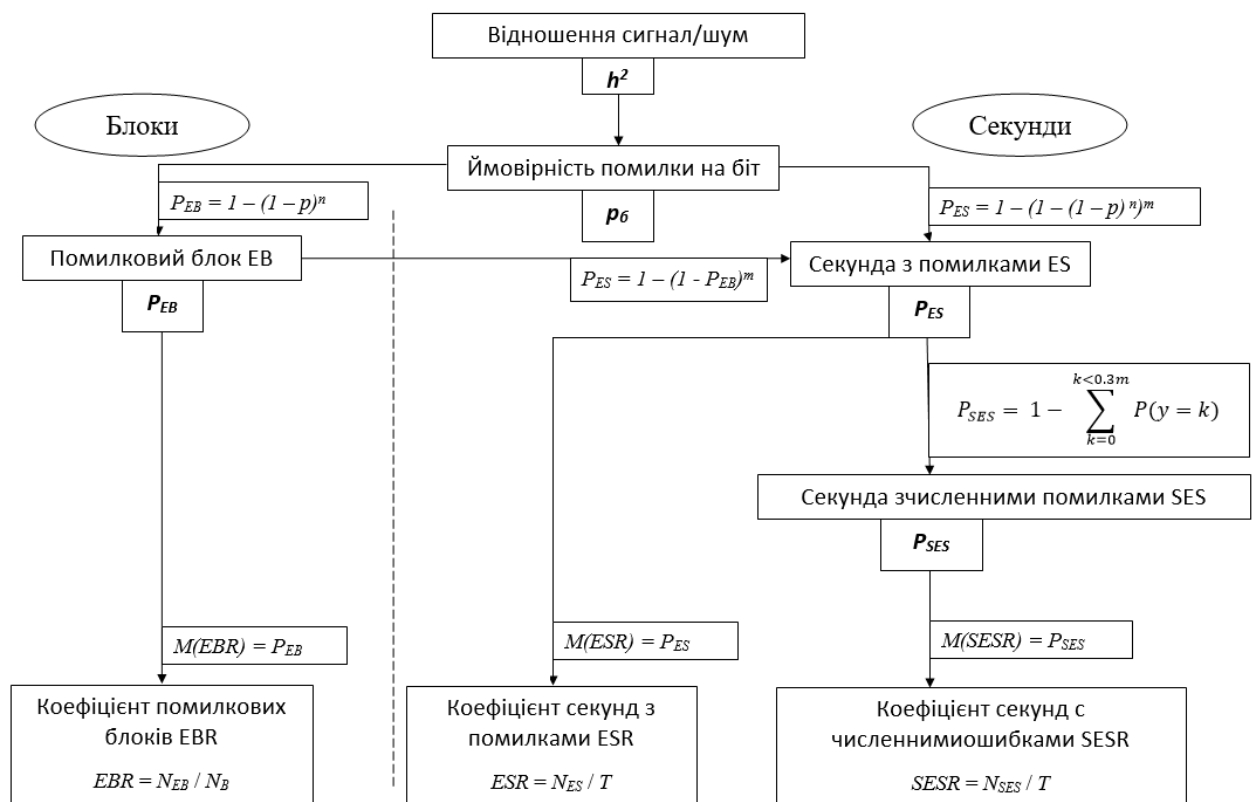


Рисунок 2.5 Ієрархія параметрів якості передачі інформації

На чолі ієрархії знаходиться ключовий параметр класичної теорії завадостійкості – відношення сигнал/шум h^2 . При заданих параметрах цифрового каналу зв'язку відношення сигнал/шум однозначно пов'язане із ймовірністю помилки на біт p_b . У світовій телекомунікаційній спільноті ймовірністю помилки на біт зазвичай представлена таким параметром, як Bit Error Ratio (англ. коефіцієнт бітових помилок).

Далі по ієрархії через запропоновані у даному розділі аналітичні співвідношення встановлюється зв'язок параметрів класичної теорії завадостійкості із показниками якості передачі інформації цифровими каналами зв'язку, які застосовуються у сучасних телекомунікаційних стандартах і рекомендаціях. Нижня частина схеми розділена на дві частини.

Перша частина відображає ієрархію блокових помилок: помилкового блоку EB та коефіцієнту помилкових блоків EBR . Згідно із визначенням, коефіцієнт помилкових блоків EBR рівний відношенню кількості помилкових блоків N_{EB} до загальної кількості переданих блоків N_B :

$$EBR = N_{EB} / N_B \quad (2.12)$$

Як видно зі схеми, ймовірність виникнення помилкового блоку P_{EB} пов'язана із ймовірністю виникнення бітової помилки p_b через формулу (2.1). Зв'язок між ймовірністю блокової помилки P_{EB} та коефіцієнтом помилкових блоків EBR встановлюється через розуміння того, що в середньому кількість помилкових блоків на заданому інтервалі вимірювання визначається ймовірністю блокової помилки P_{EB} . А середня кількість помилкових блоків відносно загальної кількості переданих блоків за визначенням дає математичне очікування коефіцієнту помилкових блоків EBR , тобто

$$M(EBR) = P_{EB}. \quad (2.13)$$

Друга частина відображає ієрархію помилок, пов'язаних із наявністю блокових помилок у секундах: секундою з помилками ES та секундою з численними помилками SES, а також відповідними коефіцієнтами ESR та SESR.

Згідно із визначенням, коефіцієнт секунд з помилками ESR рівний відношенню кількості секунд із помилками N_{ES} до загальної кількості секунд вимірювання T :

$$ESR = N_{ES} / T, \quad (2.14)$$

а коефіцієнт секунд з численними помилками SESR - відношенню кількості секунд із численними помилками N_{SES} до загальної кількості секунд вимірювання T :

$$SESR = N_{SES} / T, \quad (2.15)$$

Через формули (2.3) і (2.7) встановлено зв'язок між ймовірністю виникнення секунд з помилками P_{ES} та численними помилками P_{SES} і ймовірністю виникнення бітової помилки p_b . Аналогічно до першої частини схеми, пов'язаної із помилковим блоком, зв'язок із коефіцієнтами встановлюється через математичне очікування згідно із формулами (2.16) і (2.17):

$$M(ESR) = P_{ES} \quad (2.16)$$

$$M(SESR) = P_{SES} \quad (2.17)$$

Запропонована ієрархія є графічним представленням методики оцінки якості цифрових сигналів, яка синтезується у даній роботі [8].

2.4 Висновок з другого розділу

У класичній теорії телекомунікацій якість передачі сигналу обумовлюється завадостійкістю каналу зв'язку та визначається достовірністю передачі інформації. Показниками достовірності виступають ймовірність помилки символу в каналі зв'язку та ймовірність помилки інформаційного біта.

У сучасних стандартах і рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку існує своя ієрархія показників якості каналу зв'язку, не пов'язана з класичною теорією завадостійкості.

Таким чином, єдиної методики визначення показників якості каналів телекомунікацій не існує.

У даному розділі була запропонована нова методика оцінки показників якості передачі інформації. Задаючи вихідні данні, а саме швидкість джерела, розмір блоку і ймовірність помилки на біт можна визначити значення показників якості з рекомендації G.826 Міжнародного союзу електрозв'язку, приводячи теоретичні показники завадостійкості до стандартизованих показників достовірності в телекомунікаційних системах.

З метою систематизації співвідношень між різними параметрами якості цифрового сигналу була запропонована ієрархія параметрів якості цифрового сигналу. У цій ієрархії показники достовірності класичної теорії завадостійкості були поєднані за допомогою аналітичних закономірностей даної методики із показниками якості сучасних міжнародних стандартів.

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ЗГІДНО ІСНУЮЧИХ СТАНДАРТІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ВІДОМИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДОСТОВІРНОСТІ

Методики для оцінки якості цифрових каналів зв'язку, запропоновані у стандартах ITU-T G.821 та ITU-T G.826 – розглядають параметри і норми наскрізних характеристик помилок для міжнародних цифрових трактів і з'єднань з постійною бітовою швидкістю, але не конкретизує якість каналу та не дає його точні характеристики.

Існує потреба в створенні методики порівняльної оцінки якості цифрових каналів зв'язку для мультисервісних систем зв'язку з відомими характеристиками достовірності. Необхідний розрахунок параметрів мережі за заданими параметрами, в різних умовах експлуатації.

3.1 Детальний аналіз і напрямки покращення існуючої методики

Для цифрових трактів, працюючих на первинній швидкості або вище, рекомендація ITU-T G.826 ґрунтується на використанні блоків, на які ділиться бітова інформація, а цифрові з'єднання, що працюють на меншій швидкості, оцінюються за допомогою помилок в бітах і коефіцієнта помилок на біт, що не дає змогу оцінити канал під час проектування, до початку експлуатації.

В стандарті G.826 представлено таблицю розрахованих параметрів оцінки цифрових каналів зв'язку з заданими характеристиками. Розглянуті варіанти представлені для різних типів віртуальних контейнерів з певними значення швидкості, кількості блоків за одиницю часу та значення BER, відповідно до цього розраховано ESR, SESR, SEPI та BBER.

Таблиця 3.1 Характеристики цифрових каналів зв'язку за рекомендацією
ITU-T G.826

Швидкість (кбіт/с) Параметри	1664 (VC-11)	2240 (VC-12)	6848 (VC-2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)	601 344 (VC-4-4с)	2 405 376 (VC-4-16с)	9 621 504 (VC-4-64с)
Блоки/секунда	2000	2000	2000	8000	8000	8000	8000	8000
ESR (відповідно Рекомендації ITU-T G.826, див. Додаток 2)	0,005	0,005	0,005	0,01	0,02	NA	NA	NA
% времени SESR	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
SEPI подія/с (Додаток 3)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	$0,8 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
BBER (відповідно Рекомендації ITU-T G.826, див. Додаток 2)	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}

В таблиці 3.1 представлені граничні параметри для віртуальних контейнерів VC-11, VC-12, VC-2, VC-3, VC-4, VC-4-4с, VC-4-16с, VC-4-64с зі швидкостями 1664, 2240, 6858, 48960, 150336, 601344, 2405376, 9621504 кбіт/с відповідно. Кожний з даних типів віртуальних контейнерів відповідає своєму набору характеристик с певними типами цифрових та операційних шляхів підключення та передачі, що і пояснює різну швидкість передачі даних. Існує необхідність розрахунку граничних значень для якісних параметрів цифрових каналів зв'язку. Виконаємо постановку задачі відповідно до наших потреб. Розглянемо цифровий канал із заданими характеристиками та розрахуємо основні параметри для оцінки каналу.

Постановка задачі:

оцінити існуючу методику оцінки цифрового каналу зв'язку та провести розрахунок для граничних значень:

- показників коефіцієнта помилок по секундам с помилками (ESR);
- % часу в залежності від коефіцієнта помилок по враженим секундам з помилками (SESR);
- коефіцієнт фонових помилок блока (BBER).

Визначені параметри необхідно розрахувати відносно заданих характеристик оцінюваного каналу.

3.2 Розрахунок граничних параметрів для якісної оцінки цифрових каналів зв'язку з заданими характеристиками достовірності

Методологія оцінки каналу представлена в рекомендації ITU-T G.826 та синтезовані попередньо формули, представлені у розділі вище, використаємо як матеріальну базу для розрахунків.

Таким чином для вирішення даної задачі скористаємося формулами 2.1, 2.3, та 2.11 та використовуючи пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB, розрахуємо встановлені задачею значення використовуючи задані параметри. MATLAB — пакет прикладних програм для числового аналізу, а також мова програмування, що використовується в даному пакеті. Система створена компанією The MathWorks і є зручним засобом для роботи з математичними матрицями, малювання функцій, роботи з алгоритмами, створення робочих оболонок (user interfaces) з програмами в інших мовах програмування.

Основні параметри для розрахунку – швидкості потоків, відповідно до типів тракту, довжина блоку та вірогідність помилки в безперервному потоці BER. Максимальне значення блоку, для протоколів TCP-IP – 65 535. Відносно заданих характеристик: розміру блока, швидкості та значення помилкового біта, розраховані характеристики вибрані щодо рекомендацій ESR, SESR, SEPI та BBER та визначено граничні значення BER.

Інтегруємо формули отримані з рекомендації в MATLAB та використовуючи базові функції програмного забезпечення проведемо розрахунки потрібних значень. Проте в даному випадку існує проблема складності розрахунків біноміальних розподілів, що були спрощені до факторіалів. Лістинг програми наведений у Додатку А.

Значення, що задаються і отримуються, згідно до формату додатку:

P_b – Кількість помилкових біт за одиницю часу (BER);

n – кількість бітів в блоці;

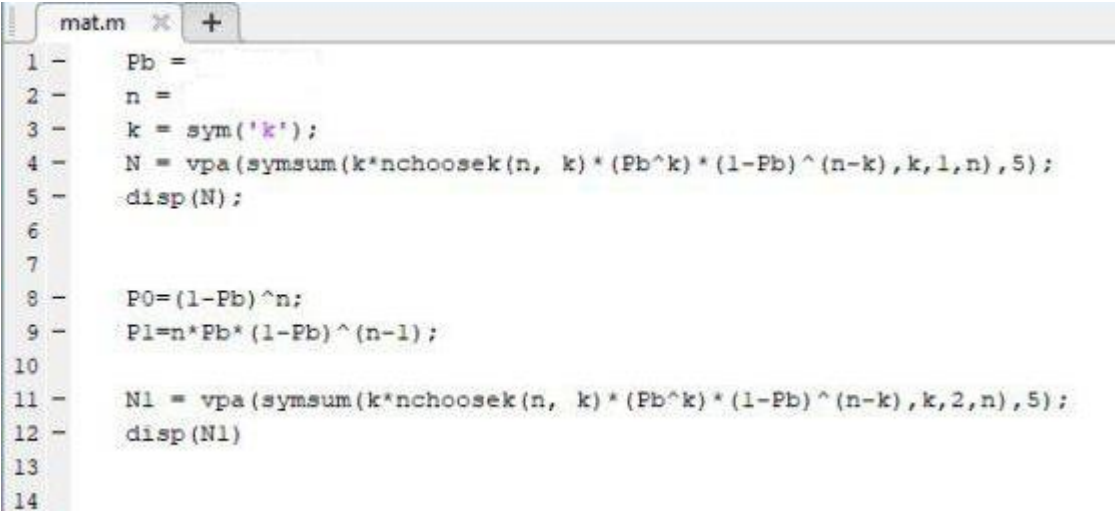
N – Фоновий помилковий блок (BBER);

N_1 – Коефіцієнт секунд з помилками, рівний відношенню секунд з помилками до загальної кількості секунд вимірювання (ESR).

Загальна послідовність дій для проведення дослідження:

- 1) Задання вихідних параметрів;
- 2) Запуск алгоритму на виконання. Результати виконання будуть відображені у консольному вікні, необхідні значення будуть відсортовані;
- 3) Вибірка необхідних даних відповідно до якісних показників каналу зв'язку;
- 4) Створена таблиця граничних значень для цифрових каналів зв'язку.

Розглянемо текстовий файл програми в графічному інтерфейсі.



```

1 - Pb =
2 - n =
3 - k = sym('k');
4 - N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
5 - disp(N);
6
7
8 - P0 = (1-Pb)^n;
9 - P1 = n * Pb * (1-Pb)^(n-1);
10
11 - N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
12 - disp(N1)
13
14
  
```

Рисунок 3.1 Формули для розрахунку в пакеті прикладних програм
для числового аналізу MATLAB

Для повноцінного розуміння оцінки якості цифрових каналів доцільно розглянути канали з різними значеннями бітової помилки, з визначеними заданими характеристиками. Базовими характеристиками візьмемо значення для трактів з рекомендації.

Таблиця 3.2. Базові значення для розрахунку взяті з рекомендацій ITU-TG.826

Швидкість (кбіт/с) Параметри	1664 (VC-11)	2240 (VC- 12)	6848 (VC- 2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)	601 344 (VC- 4-4c)	2 405 376 (VC-4-16c)	9 621 504 (VC-4-64c)
Блоки/секунда	2000	2000	2000	8000	8000	8000	8000	8000

Виконаємо розрахунки в програмному забезпеченні встановивши параметри каналу з заданими характеристиками достовірності:



```

1 - Pb = 10^-6;
2 - n = 832;
3 - k = sym('k');
4 - N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
5 - disp(N);
6
7
8 - P0 = (1-Pb)^n;
9 - P1 = n * Pb * (1-Pb)^(n-1);
10
11 - N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
12 - disp(N1)
13
14
15
16
17 % Peb = 1 - (1 - P0 - P1)^n;
18
19

```

Command Window

```

>> mat
0.000832

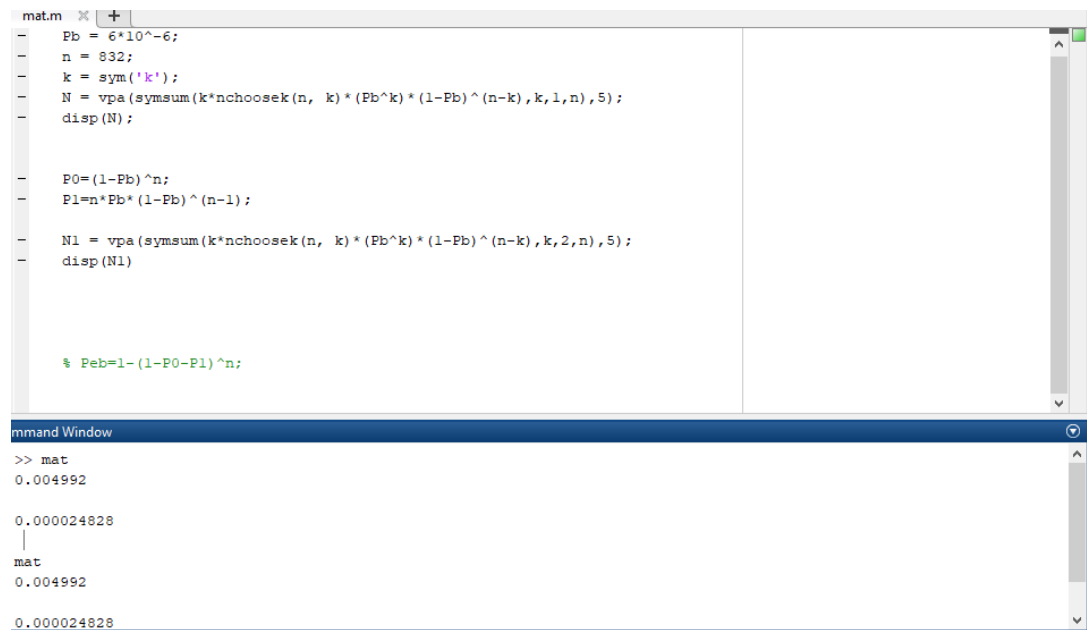
6.9111e-7
fx >>

```

Рисунок 3.2 Розрахунок за допомогою програмного забезпечення MATLAB

Звернувши увагу на значення ESR та BBER, отримані при розрахунку, можна зробити висновок, що достовірність передачі в такому каналі дуже

висока. Методом повторних розрахунків було підібрано значення BER, для отримання достатньої достовірності робочого каналу.



```

mat.m
- Pb = 6*10^-6;
- n = 832;
- k = sym('k');
- N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
- disp(N);

- P0=(1-Pb)^n;
- P1=n*Pb*(1-Pb)^(n-1);

- N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
- disp(N1)

% Peb=1-(1-P0-P1)^n;

Command Window
>> mat
0.004992

0.000024828
|
mat
0.004992

0.000024828

```

Рисунок 3.3 Розрахунок шуканих параметрів при достатньому значенні BER

Бачимо, що базове значення бітової помилки 10^{-6} , для перших швидкостей цифрового каналу можна покращити у 6 разів, до

значення $6 * 10^{-6}$. Використавши отримані розрахунки отримаємо значення ESR та BER з достатнім рівнем достовірності.



```

19
Command Window

run('C:\Users\romad\Downloads\Telegram Desktop\mat.m')
0.004992

0.000024828

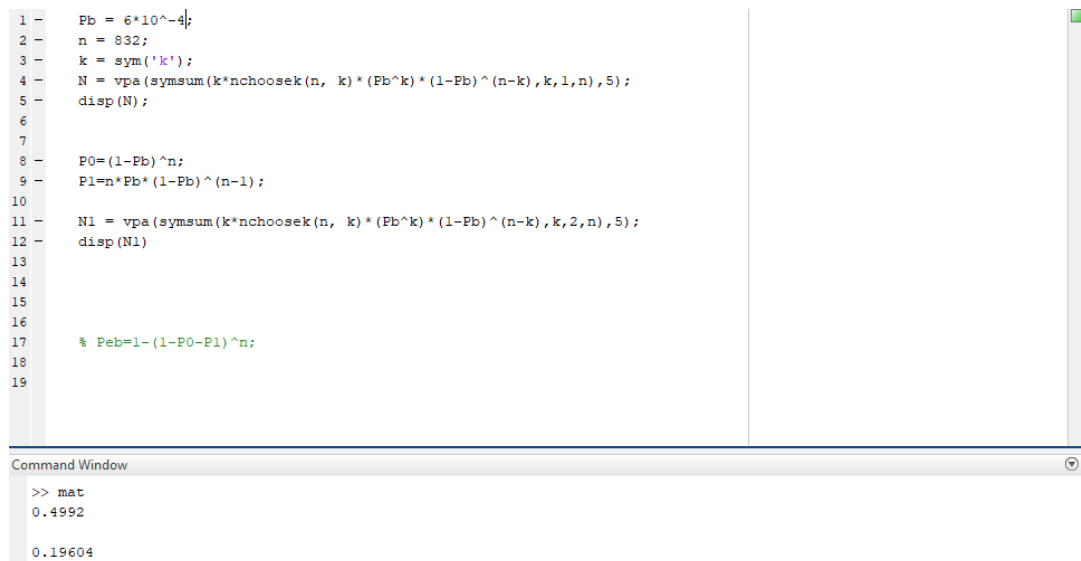
>> mat
0.004992

fx 0.000024828

```

Рисунок 3.4 Значення розраховані в MATLAB за заданими характеристиками цифрового каналу

Використовуючи задані параметри спробуємо збільшувати значення BER для оцінки якості роботи каналу при різних умовах.



```

1 - Pb = 6*10^-4;
2 - n = 832;
3 - k = sym('k');
4 - N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
5 - disp(N);
6
7
8 - P0=(1-Pb)^n;
9 - P1=n*Pb*(1-Pb)^(n-1);
10
11 - N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
12 - disp(N1)
13
14
15
16
17 % Peb=1-(1-P0-P1)^n;
18
19
Command Window

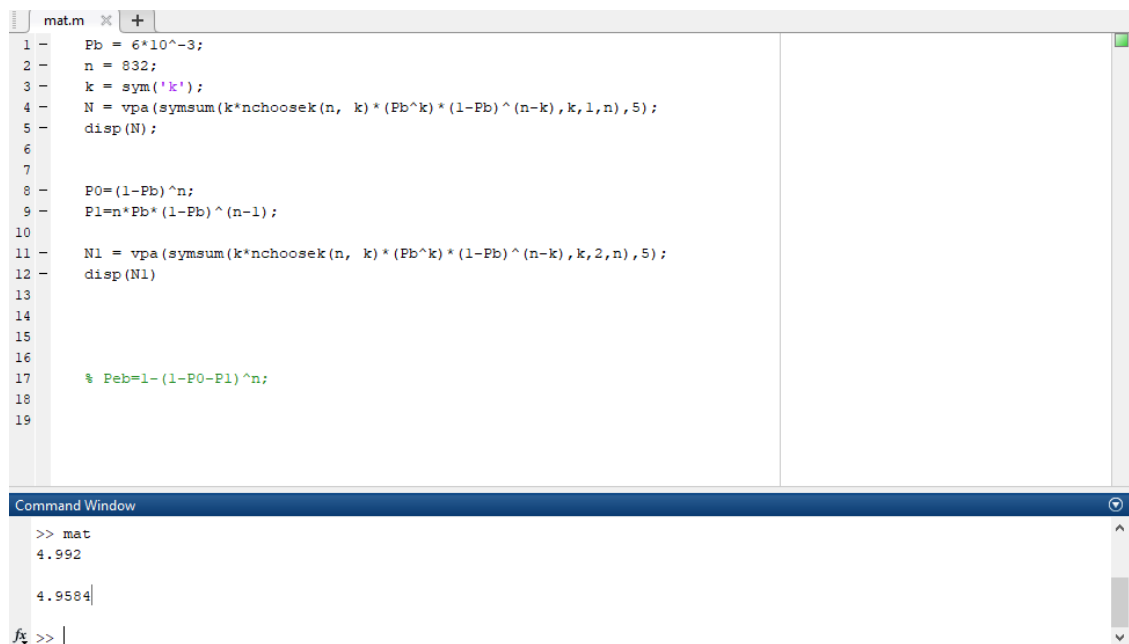
>> mat
0.4992

0.19604

```

Рисунок 3.5 Розрахунок шуканих параметрів при збільшенні значення BER, $(BER = 6 \cdot 10^{-4})$

Підніmemo значення BER до значення $6 \cdot 10^{-3}$, та зробимо висновок щодо зміни даного показника:



```

1 - Pb = 6*10^-3;
2 - n = 832;
3 - k = sym('k');
4 - N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
5 - disp(N);
6
7
8 - P0 = (1-Pb)^n;
9 - P1 = n*Pb * (1-Pb)^(n-1);
10
11 - N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
12 - disp(N1);
13
14
15
16
17 % Peb=1-(1-P0-P1)^n;
18
19

```

Command Window

```

>> mat
4.992
4.9584
fx >> |

```

Рисунок 3.6 Розрахунок шуканих параметрів при збільшенні значення BER, ($BER = 6 \cdot 10^{-3}$)

При збільшенні ж значення BER, якісні показники каналу різко падають, достовірність передачі в такому каналі наднизька, для його продуктивного використання.

Змінюючи задані параметри розраховуємо і заповнюємо значення таблиці граничних характеристик цифрових каналів зв'язку.

Збільшуючи швидкість передачі в каналі, достовірність передачі буде падати, потрібно підстроювати параметри для отримання показників якісної роботи каналу. Маніпулюючи значенням BER в межах норми для цифрових каналів, отримуємо значення ESR, SESR, SEPI та BBER.

Другий тип віртуального контейнера зі значенням швидкості 2240 кбіт/с, кількістю блоків за секунду – 2000. Практичним шляхом розраховано, що має місце збільшення значення BER до показника $4,5 \cdot 10^{-6}$.

```

1 - Pb = 4.5*10^-6;
2 - n = 1120;
3 - k = sym('k');
4 - N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
5 - disp(N);
6
7
8 - P0=(1-Pb)^n;
9 - P1=n*Pb*(1-Pb)^(n-1);
10
11 - N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
12 - disp(N1)
13
14
15
16
17 % Peb=1-(1-P0-P1)^n;
18
19

```

Command Window

```

>> mat
0.00504

0.000025315
fx >>

```

Рисунок 3.7 Розрахунок параметрів при збільшенні швидкості

По аналогії з попереднім віртуальним контейнером, використовуючи задані параметри спробуємо збільшувати значення BER для оцінки якості роботи каналу при різних умовах.

```

1 - Pb = 4.5*10^-4;
2 - n = 1120;
3 - k = sym('k');
4 - N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 1, n), 5);
5 - disp(N);
6
7
8 - P0=(1-Pb)^n;
9 - P1=n*Pb*(1-Pb)^(n-1);
10
11 - N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k) * (Pb^k) * (1-Pb)^(n-k), k, 2, n), 5);
12 - disp(N1)
13
14
15
16
17 % Peb=1-(1-P0-P1)^n;
18
19

```

Command Window

```

>> mat
0.504

0.19943
fx >>

```

Рисунок 3.8 Розрахунок шуканих параметрів при збільшенні значення BER,
(BER = $4,5 \cdot 10^{-4}$)

Можемо зробити висновок, що якісні показники каналу, також, різко падають, що не є шуканим для нас результатом.

Проведемо розрахунки для всіх типів цифрових каналів заданих в таблиці 3.2, та внесемо отримані якісні характеристики цифрового каналу в таблицю.

На базі даних розрахунків зробимо висновок щодо отриманих показників та можливості оцінки якості цифрового каналу.

Таблиця 3.3 Розраховані граничні характеристики цифрових каналів зв'язку

Швидкість (кбит/с) Параметри	1664 (VC-11)	2240 (VC-12)	6848 (VC-2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)
Блоки/секунда	2000	2000	2000	8000	8000
BER	6×10^{-6}	$4,5 \times 10^{-6}$	$1,45 \times 10^{-6}$	$0,85 \times 10^{-6}$	$0,25 \times 10^{-6}$
ESR (відповідно Рекомендації ITU-T G.826, див. Додаток 2)	0,00501	0,00499	0,00496	0,01	0,02
% времени SESR	0,001	0,001	0,001	0,005	0,005
SEPI подія/с (Додаток 3)	$0,99 \times 10^{-4}$	$0,99 \times 10^{-4}$	$0,99 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	1×10^{-4}
BBER (відповідно Рекомендації ITU-T G.826, див. Додаток 2)	$2,48 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}

З отриманих показників бачимо, що зі збільшенням швидкості передачі ймовірність появи помилкового біту збільшується, показник BER зменшується, а , отже, вірогідність появи помилкового блоку зростає.

За рахунок маніпуляцій з показниками бітової помилки розраховані значення показників коефіцієнта помилок по секундам з помилками (ESR) та коефіцієнт фонових помилок блоку (BBER) для повноцінної якісної роботи каналу, за заданими характеристиками достовірності.

Визначення можливості появи помилкового блоку, секунди з помилками і відсотка секунд з помилками до всього часу, для більш високих швидкостей – не має сенсу, так як показник BER опускається до значень

низькоякісних каналів. Зменшення значення BER також призводить до зниження якості роботи каналу, що не є шуканим результатом.

3.3 Висновок до третього розділу

Методики для оцінки якості цифрових каналів зв'язку, запропоновані у стандартах ITU-T G.821 та ITU-T G.826 – розглядають параметри і норми наскрізних характеристик помилок для міжнародних цифрових трактів і з'єднань з постійною бітовою швидкістю, але не дає можливість повноцінно оцінити якість каналу в процесі експлуатації та не дає його точні характеристики.

У даному розділі було досліджено стандарти та рекомендації ITU-TG.826 та на базі отриманих з цих стандартів формул розраховано значення характеристик цифрових каналів зв'язку з заданими показниками достовірності та визначено граничні характеристики для якісної роботи в мультисервісних мережах.

На основі математичних виразів створено програмний код, який по заданим параметрам розраховує шукані характеристики цифрового каналу. Код створений на базі пакету прикладних програм для числового аналізу MATLAB, та дає можливість отримати саме граничні значення для якісної передачі інформації в цифрових каналах зв'язку з заданою достовірністю.

Отримані за допомогою розрахунку значення представлені в таблиці 3.3.

ВИСНОВКИ

За результатами даної магістерської роботи була запропонована нова методика оцінки показників якості передачі інформації. Для розробки цієї методики у роботі було проведено детальний аналіз існуючих методів оцінки якості каналів зв'язку, погляду сучасних стандартів та рекомендацій щодо якості передачі інформації та її параметрів. Було наведено теоретичне обґрунтування та підтвердження за допомогою практичних розрахунків на базі пакету прикладних програм для числового аналізу MATLAB.

З метою систематизації співвідношень між різними параметрами якості цифрового сигналу була запропонована ієрархія параметрів якості цифрового сигналу. У цій ієрархії показники достовірності класичної теорії завадостійкості були поєднані за допомогою аналітичних закономірностей даної методики із показниками якості сучасних міжнародних стандартів.

Завдяки новій методиці можна ще на етапі розробки та проектування оцінювати показники завадостійкості цифрових каналів телекомунікацій, що на сьогодні можуть бути оцінені лише під час експлуатації відповідного каналу за допомогою безпосереднього вимірювання за допомогою спеціалізованого обладнання та додаткових надбудов. Вона дозволяє визначати і пред'являти науково обґрунтовані вимоги до показників якості передачі інформації цифровими каналами зв'язку, а також до фізичних та організаційних факторів, з якими пропонуваною методикою встановлюється зв'язок. Також за допомогою нової методики можливо оцінювати рівень відповідності параметрів якості передачі інформації каналами існуючих цифрових телекомунікаційних систем вимогам міжнародних стандартів та рекомендацій.

Показники якісних параметрів досліджуваних цифрових каналів, отриманів процесі практичних розрахунків, дають чітку оцінку характеристикам тестованого каналу, без потреби побудови каналу, для його

оцінки в процесі експлуатації. Синтезовані програмні коди можна багаторазово використовувати для отримання шуканих характеристик каналу, та використовувати як базу для побудови каналу за заданими характеристиками достовірності та та оптимізувати експлуатацію існуючих та проектування нових цифрових каналів зв'язку за критерієм якості передачі інформації відповідно до вимог міжнародних стандартів та рекомендацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи теорії телекомунікацій: підручник / Л.О. Уривський, О.В. Корнейко, О.В. Кувшинов [та ін.]; за аг. Ред.. М.Ю. Ільченка. – К. Вид-во ІСЗЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 786с. : іл.;
2. Конспект лекцій з дисципліни «Прикладна теорія інформації для телекомунікацій» для студ. спец. 8.092401 "Телекомунікаційні системи та мережі" / ІТС, НТУУ «КПІ»; вик. А.В. Мошинська. – Київ, 2015-2016;
3. Конспект лекцій з дисципліни «Імітаційне моделювання систем та процесів» для студ. спец. 8.092401 "Телекомунікаційні системи та мережі" / ІТС, НТУУ «КПІ»; вик. Л.О. Уривський, С.О. Осипчук– Київ, 2015;
4. Конспект лекцій з дисципліни «Спеціальні розділи математики: елементи теорії прийняття рішень та системного аналізу» для студ. спец. 8.092401 "Телекомунікаційні системи та мережі" / ІТС, НТУУ «КПІ»; вик. О.І. Лисенко. – Київ, 2015;
5. Мошинская А.В., Л.А. Урывский. Методика оценки качества цифрового сигнала // А.В. Мошинская, Л.А. Урывский - «Проблеми телекомунікації»: дев'ята міжнародна науково-технічна конференція, присвячена дню науки в Україні (ПТ-15) 21-24 квітня 2015 р., К.: с. 68...71;
6. Мошинская А.В., Георгін Д.А. Синтез методика оценки качества цифрового сигнала // Мошинская А.В., Георгін Д.А - «Проблеми телекомунікації»: десята міжнародна науково-технічна конференція, присвячена дню науки в Україні (ПТ-16) 19-22 квітня 2016 р., К.: с. 62...64;
7. Мошинская А.В., Георгин Д.А. Анализ показателей качества цифрового сигнала // Мошинська А.В., Георгін Д.А - «Проблеми телекомунікацій»: одинадцята міжнародна науково-технічна конференція, присвячена Дню науки та Всесвітньому Дню телекомунікацій (ПТ-17) 18-21 квітня 2017 р., К.: с. 54...56;

8. Мошинська А.В., Ольховик Д.М. Методика оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку //Мошинская А.В., Ольховик Д.М - «Перспективи телекомунікації 2019»: тринадцята міжнародна науково-технічна конференція, присвячена Дню науки та Всесвітньому Дню телекомунікацій 15-19 квітня 2019 р., К.: с. 49...51;
9. Слепов, Н. Н. Оценка показателей ошибок цифровых линий связи // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2002. – № 5. – С. 22-31;
10. Иванцов И.Ю. Измерения в цифровых системах связи// «Журнал сетевых решений/LAN», № 10, 2005;
11. Иванцов И.Ю. Методы оценки качества цифрового сигнала // «Журнал сетевых решений/LAN», № 11-12, 2005; № 1, 2006;
12. Постійне представництво України при відділенні ООН та інших міжнародних організаціях у Женеві <http://geneva.mfa.gov.ua/ua/ukraine-io/itu>
13. Microsoft Developer Network official web-site. Класс Random [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.random\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.random(v=vs.110).aspx)
14. ITU-T Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections, – 2002. – pp. 6-9;
15. В.Ф.Ситник. Н.С.Орленко. Імітаційне моделювання: Навч.-метод. посібник для самост. вивч. дисц.-К.:КНЕУ, 1999.-208с.;
16. Р.М.Літнарів. Конструювання і дослідження математичних моделей. Множинний аналіз. Частина 1. МЕНУ, Рівне, 2009.-127 с.;
17. D. E. Knuth. *The Art of Computer Programming, Volume 2: Seminumerical Algorithms*. Addison-Wesley, Reading, MA, third edition, 1997;
18. Большев Л. Н., Смирнов Н. В., Таблицы математической статистики, М., 1965;
19. Олифер В. Г., Олифер Н. А.. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник по компьютерным сетям. – Питербург, 2006 г. – 960с.;

20. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник /: Под ред. Л. М. Финка. — М.: Радио и связь, 1981. — 232 с;
21. J. G. Proakis, Digital Communication, 4th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2000;
22. Кларк Дж. Кодирование с исправление ошибок в системах цифровой связи / Кларк Дж., Кейн Дж. — М.: Радио и связь, 1987. — с. 392.

ДОДАТКИ

Додаток А. Лістинг програми розрахунків, що застосовується для аналізу показників якості передачі цифрових сигналів зв'язку у Розділі 3.

Мова програмування MATLAB, пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB

```
Pb =x;
n = y;
k = sym('k');
N = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k)*(Pb^k)*(1-Pb)^(n-k),k,1,n),5);
disp(N);

P0=(1-Pb)^n;
P1=n*Pb*(1-Pb)^(n-1);

N1 = vpa(symsum(k*nchoosek(n, k)*(Pb^k)*(1-Pb)^(n-k),k,2,n),5);
disp(N1)
```